



SKRIPSI (ME 091329)

**ANALISA PENGARUH TEKANAN DAN TEMPERATUR
RUANG BAKAR TERHADAP TEGANGAN PADA
SILINDER HEAD MOTOR DIESEL 4 LANGKAH 125 HP**

**Agung Pranggapati
NRP.4210 100 072**

Dosen Pembimbing 1 :
Ir. Tjoek Soeprajitno
NIP. 1951.0526.1980.01.1001

Dosen Pembimbing 2 :
Ir. Aguk Zuhdi M. Fathallah, M.Eng., Ph.D
NIP. 1951.0526.1980.01.1001

**JURUSAN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2014**



FINAL ASSIGNMENT (ME 091329)

AN ANALYSIS THE EFFECT OF COMBUSTION CHAMBER PRESSURE AND TEMPERATURE ON THE STRESS OF 4 STROKE 125 HP DIESEL ENGINE CYLINDER HEAD

Agung Pranggapati
NRP.4210 100 072

Advisor 1 :

Ir. Tjoek Soeprajitno
NIP. 1951.0526.1980.01.1001

Advisor 2 :

Ir. Aguk Zuhdi M. Fathallah, M.Eng., Ph.D
NIP. 1951.0526.1980.01.1001

**DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2014**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA PENGARUH TEKANAN DAN TEMPERATUR RUANG BAKAR TERHADAP TEGANGAN PADA SILINDER HEAD MOTOR DIESEL 4 LANGKAH 125 HP

SKRIPSI

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Marine Power Plant (MPP)
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**Agung Pranggapati
NRP. 4210 100 072**

Disetujui Oleh Pembimbing Skripsi :

1. Ir. Tjoek Soeprajitno

2. Ir. Aguk Zuhdi M. Fathallah, M.Eng., Ph.D (

Surabaya, Juli 2014

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISA PENGARUH TEKANAN DAN TEMPERATUR
RUANG BAKAR TERHADAP TEGANGAN PADA SILINDER
HEAD MOTOR DIESEL 4 LANGKAH 125 HP**

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Marine Power Plant (MPP)
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Agung Pranggapati
NRP. 4210 100 072**

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS :

DR. Ir. Agoes A. Masroeri, M.Eng (

Surabaya, Juli 2014

ANALISA PENGARUH TEKANAN DAN TEMPERATUR RUANG BAKAR TERHADAP TEGANGAN PADA SILINDER HEAD MOTOR DIESEL 4 LANGKAH 125 HP

Nama Mahasiswa : Agung Pranggapati
NRP : 4210 100 072
Jurusan : Teknik Sistem Perkapalan
Dosen Pembimbing 1 : Ir. Tjoek Soeprajitno
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Aguk Zuhdi M.F, M.Eng., Ph.D

ABSTRAK

Reverse engineering adalah salah satu metode dalam mendesain motor diesel, dimana motor diesel yang sudah ada digunakan sebagai referensi dalam membuat desain. Ruang bakar pada motor diesel menghasilkan tekanan dan temperatur tinggi yang dapat menyebabkan tegangan pada silinder head. Kerusakan fatal pada silinder head dapat terjadi karena tegangan yang terlalu besar. Maka dari itu, diperlukan analisa distribusi tegangan yang disebabkan oleh tekanan dan temperatur dari ruang bakar pada hasil desain silinder head. Pada penelitian ini dilakukan analisa tegangan mekanik, thermal, dan total (mekanik-thermal) dengan menggunakan *Finite Element Method* (FEA) serta pemilihan material, hingga diperoleh hasil desain silinder head yang optimum.

Kata kunci : *finite element method*, motor diesel, *reverse engineering*, silinder head, tegangan

AN ANALYSIS THE EFFECT OF COMBUSTION CHAMBER PRESSURE AND TEMPERATURE ON THE STRESS OF 4 STROKE 125 HP DIESEL ENGINE CYLINDER HEAD

Name : Agung Pranggapati
NRP : 4210 100 072
Department : Teknik Sistem Perkapalan
Advisor 1 : Ir. Tjoek Soeprajitno
Advisor 2 : Ir. Aguk Zuhdi M.F, M.Eng., Ph.D

ABSTRACT

Reverse engineering is one of the methods to design the diesel engines, for instance the existing diesel engine is used as a reference to design the cylinder head. The combustion chamber of diesel engine produce high pressure and high temperature which can cause stress on the cylinder head. The worst damage is able to be occurred if the stress in cylinder head is very high. Because of that reason a research of stress distribution in cylinder head design caused by combustion chamber pressure and temperature is very important. In this research is analyzed about mechanical stress, thermal stress, and total stress (mechanics-thermal) using Finite Element Method (FEM) and materials selection. As the results of the research is found the optimum design of the cylinder head.

Key word: cylinder head, diesel engine, finite element method, reverse engineering, stress

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena berkat-Nya saya dapat menyelesaikan tugas akhir yang menjadi syarat untuk mendapatkan gelar sarjana dari Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.

Dalam menyelesaikan tugas akhir saya banyak mendapatkan dukungan dan bantuan mulai dari awal pengerjaan sampai dengan diselesaikannya tugas akhir ini, oleh karena itu saya ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, papa dan mama, yang dengan ikhlas telah membesarkan saya dan memberi dukungan penuh hingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini. Tidak lupa juga mengucapkan segenap terima kasih kepada keluarga yang kerap memberikan motivasi kepada saya.
2. Bapak DR. Ir. Agoes A. Masroeri, M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan.
3. Bapak Ir. Tjoek Soeprajitno dan Bapak Ir. Aguk Zuhdi M. F., M.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing yang sudah memberikan saran, bimbingan, dan masukan selama pengerjaan tugas akhir.
4. Bapak Trika Pitana, ST. M.Sc, selaku koordinator Skripsi dan Bapak Indra Ranu Kusuma, ST., M.Sc. selaku dosen wali.
5. Bapak dosen beserta staf dan karyawan Jurusan Teknik Sistem Perkapalan – Fakultas Teknologi Kelautan – ITS.
6. Seluruh rekan-rekan PINISI'10.
7. Semua rekan-rekan tugas akhir dari tim *reverse engineering* untuk kerja samanya mulai dari

pembongkaran mesin sampai dengan pengerjaan laporan.

8. Seluruh member Laboratorium Mesin Kapal & Getaran JTSP FTK - ITS serta rekan-rekan tugas akhir dari tim *dual fuel diesel engine* yang sudah banyak membantu dalam menyelesaikan tugas akhir.
9. Pengurus Laboratorium Komputasi & Studio 3D atas pinjaman fasilitas komputer disaat komputer di Laboratorium Mesin Kapal & Getaran tidak bisa digunakan untuk simulasi software.
10. Keluarga penghuni lantai 1 kontrakan Keputih Perintis V/24A, Jimmy, Ibram, Dhian, Kacong, Suroso, Dani, dan penghuni lantai 2, Deni, Awallu, Nanang, Joko, Argo atas motivasi dan dukungan moral sehingga tugas akhir ini bisa diselesaikan.
11. Rhocky, Ikhsan, Ela, Robin, dan semua teman-teman eks XII IPA 6 - SMA 16 Surabaya angkatan 2007.
12. Zata Karamina Pramesti.
13. Dan semua pihak serta rekan-rekan yang sudah membantu, memberi semangat dan motivasi yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	3
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Umum.....	5
2.2 Silinder Head.....	6
2.3 Tegangan.....	7

2.4	Finite Element Analysis	9
BAB III.....		13
METODOLOGI PENELITIAN		13
3.1	Membongkar dan Mengidentifikasi Mesin	15
3.2	Membuat Draft Rancangan Desain Silinder Head	15
3.3	Membuat Desain Silinder Head.....	16
3.4	Analisa Struktur.....	18
3.4.1	Diskritisasi / Meshing.....	20
3.4.2	Simulasi Distribusi Panas.....	21
3.4.2	Thermal Stress Analysis.....	21
3.4.2	Pressure Stress Analysis.....	22
3.4.2	Total Stress.....	22
3.5	Analisa Data	22
BAB IV		25
ANALISA DAN PEMBAHASAN		25
4.1	Tegangan Akibat Tekanan Pembakaran.....	25
4.1.2	Cast Iron EN-GJV-450	26
4.1.4	Cast Iron EN-GJS-1200.....	28
4.1.3	Aluminium Alloy AlSi ₇ Mg	29
4.1.5	Analisa Tegangan Akibat Tekanan Pembakaran.....	31
4.2	Tegangan Thermal.....	33
4.2.1	Cast Iron EN-GJL-250	33
4.2.2	Cast Iron EN-GJV-450	34

4.2.3	Cast Iron EN-GJS-1200.....	36
4.2.4	Aluminium Alloy AlSi ₇ Mg	38
4.2.5	Analisa Tegangan Thermal.....	40
4.3	Tegangan Total.....	41
4.3.1	Cast Iron EN-GJL-250	41
4.3.2	Cast Iron Cast Iron EN-GJV-450	43
4.3.3	Cast Iron Cast Iron EN-GJS-1200.....	45
4.3.4	Aluminium Alloy AlSi ₇ Mg	46
4.2.5	Analisa Tegangan Akibat Tekanan Pembakaran.....	47
4.4	Analisa Perbandingan Tegangan Pada Silinder Head	50
4.4.1	Perbandingan Tegangan Minimum	50
4.4.2	Perbandingan Tegangan Maksimum	50
4.4.3	Perbandingan Tegangan Total dengan Yield Strength	51
BAB V		53
KESIMPULAN DAN SARAN.....		53
5.1	Kesimpulan.....	53
5.2	Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA.....		55
LAMPIRAN A		57
LAMPIRAN B		58
LAMPIRAN C		59
LAMPIRAN D		60

LAMPIRAN E.....	61
LAMPIRAN F.....	62
LAMPIRAN G.....	63
LAMPIRAN H.....	66
LAMPIRAN I.....	69
LAMPIRAN J.....	72
BIODATA PENULIS.....	75

DAFTAR GAMBAR

<i>Gambar 2.1 Bagian-bagian Motor Diesel</i>	<i>4</i>
<i>Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan</i>	<i>10</i>
<i>Gambar 3.2 Desain Silinder Head</i>	<i>12</i>
<i>Gambar 3.3 Simulasi Prediksi Performa Engine</i>	<i>15</i>
<i>Gambar 3.4 Desain Silinder Head Setelah Dilakukan Meshing</i>	<i>16</i>
<i>Gambar 3.5 Input Tekanan dan Temperatur Akibat Pembakaran Pada Permukaan Silinder Head Untuk Simulasi</i>	<i>17</i>
<i>Gambar 3.6 Bagan Urutan Simulasi Total Stress</i>	<i>18</i>
<i>Gambar 4.1 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250</i>	<i>22</i>
<i>Gambar 4.2 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250</i>	<i>23</i>
<i>Gambar 4.3 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJV-450</i>	<i>24</i>
<i>Gambar 4.4 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJV-450</i>	<i>24</i>
<i>Gambar 4.5 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200</i>	<i>25</i>
<i>Gambar 4.6 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200</i>	<i>26</i>
<i>Gambar 4.7 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Pada Silinder Head Dengan Material Aluminium Alloy AlSi7Mg</i>	<i>27</i>
<i>Gambar 4.8 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Aluminium Alloy AlSi7Mg</i>	<i>28</i>

<i>Gambar 4.9 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Thermal Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250</i>	<i>30</i>
<i>Gambar 4.10 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Thermal Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250</i>	<i>31</i>
<i>Gambar 4.11 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Thermal Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJV-450</i>	<i>33</i>
<i>Gambar 4.12 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Thermal Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200. 34</i>	
<i>Gambar 4.13 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Thermal Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200</i>	<i>35</i>
<i>Gambar 4.14 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Thermal Pada Silinder Head Dengan Material Aluminium Alloy AlSi7Mg</i>	<i>36</i>
<i>Gambar 4.15 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Thermal Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Aluminium Alloy AlSi7Mg</i>	<i>36</i>
<i>Gambar 4.16 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Total Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250</i>	<i>39</i>
<i>Gambar 4.17 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Total Maksimum Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250</i>	<i>40</i>
<i>Gambar 4.18 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Total Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJV-450</i>	<i>41</i>
<i>Gambar 4.19 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Total Maksimum Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJV-450</i>	<i>41</i>
<i>Gambar 4.20 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Total Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200</i>	<i>42</i>

Gambar 4.21 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Total Maksimum Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200 43

Gambar 4.22 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Total Pada Silinder Head Dengan Material Aluminium Alloy AlSi7Mg 44

Gambar 4.23 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Total Maksimum Pada Silinder Head Dengan Material Aluminium Alloy AlSi7Mg 44



DAFTAR TABEL

<i>Tabel 3.1 Spesifikasi Motor Diesel Yang Akan Didesain</i>	<i>11</i>
<i>Tabel 3.2. Tabel Data Dari Mesh</i>	<i>16</i>
<i>Tabel 4.1 Tabel Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Akibat Tekanan Pembakaran</i>	<i>28</i>
<i>Tabel 4.2 Tabel Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Thermal ...</i>	<i>37</i>
<i>Tabel 4.3 Tabel Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Total</i>	<i>45</i>
<i>Tabel 4.4 Tabel Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Mekanik, Thermal, dan Tegangan Total Minimum</i>	<i>46</i>
<i>Tabel 4.5 Tabel Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Mekanik, Thermal, dan Tegangan Total Maksimum.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabel 4.6 Tabel Tegangan Total Maksimum & Yield Strength Material.....</i>	<i>48</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu riset yang direncanakan oleh Laboratorium Mesin Kapal dan Getaran Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK ITS adalah mendesain motor diesel. Dalam membuat desain motor diesel bisa dengan cara mendesain dari awal atau dengan mendesain dengan menggunakan satu desain yang digunakan sebagai referensi, dinamakan *reverse engineering*. Rekayasa balik atau *reverse engineering* sudah banyak dilakukan dalam berbagai bidang, termasuk pada motor bakar dalam. Rekayasa balik adalah proses untuk mengetahui prinsip kinerja dari sebuah alat, objek, atau sistem yang dapat dilakukan dengan menganalisa struktur, fungsi, dan pengoperasiannya.

Motor diesel sebagai salah satu motor bakar dalam yang dilakukan proses rekayasa balik pada dasarnya mempunyai rasio kompresi yang cukup besar. Rasio kompresi yang besar tentunya akan mengakibatkan tekanan pada ruang bakar yang besar pula. Silinder head merupakan komponen dari motor diesel yang terkena dampak langsung berupa tekanan dan panas yang dihasilkan dari pembakaran pada ruang bakar. Tekanan yang diakibatkan oleh pembakaran akan menyebabkan terjadinya tegangan, begitu juga dengan temperatur tinggi.

Kerusakan pada silinder head bisa terjadi akibat dari tegangan yang terlalu besar dan pemilihan material yang tidak tepat, karena setiap material memiliki karakteristik dan kemampuan menahan beban yang berbeda-beda. Dengan simulasi distribusi panas, tegangan thermal, tegangan mekanis, dan tegangan total (thermo-mekanik) menggunakan software diharapkan akan diketahui besarnya tegangan maksimum yang terjadi pada silinder head dari motor diesel hasil rekayasa balik

sehingga dapat ditentukan material yang tepat untuk silinder head dari motor diesel 4 langkah 125 HP.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini membahas mengenai:

1. Berapa besarnya tegangan pada silinder head motor diesel hasil rekayasa balik yang diakibatkan oleh tekanan dari pembakaran pada ruang bakar.
2. Berapa besarnya tegangan pada silinder head motor diesel hasil rekayasa balik yang diakibatkan oleh temperatur dari pembakaran pada ruang bakar.
3. Berapa besarnya tegangan pada silinder head motor diesel hasil rekayasa balik yang diakibatkan oleh tekanan dan temperatur dari pembakaran pada ruang bakar.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Silinder head yang digunakan sebagai acuan adalah silinder head pada motor diesel Cummins tipe 4BTA3.9-M125.
2. Penelitian hanya dilakukan pada kondisi *steady state*.
3. Material yang digunakan adalah Cast Iron EN-GJL-250, EN-GJV-450, EN-GJS-1200, dan Aluminium Alloy AlSi₇Mg.

1.4 Tujuan

1. Mengetahui berapa besarnya tegangan pada silinder head motor diesel hasil rekayasa balik

yang diakibatkan oleh tekanan dari pembakaran pada ruang bakar.

2. Mengetahui berapa besarnya tegangan pada silinder head motor diesel hasil rekayasa balik yang diakibatkan oleh temperatur dari pembakaran pada ruang bakar.
3. Mengetahui berapa besarnya tegangan pada silinder head motor diesel hasil rekayasa balik yang diakibatkan oleh tekanan dan temperatur dari pembakaran pada ruang bakar.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah mengetahui besarnya tegangan yang terjadi pada silinder head dari motor diesel hasil rekayasa balik yang diakibatkan oleh tekanan dan temperatur sehingga dapat ditentukan pemilihan material yang tepat.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

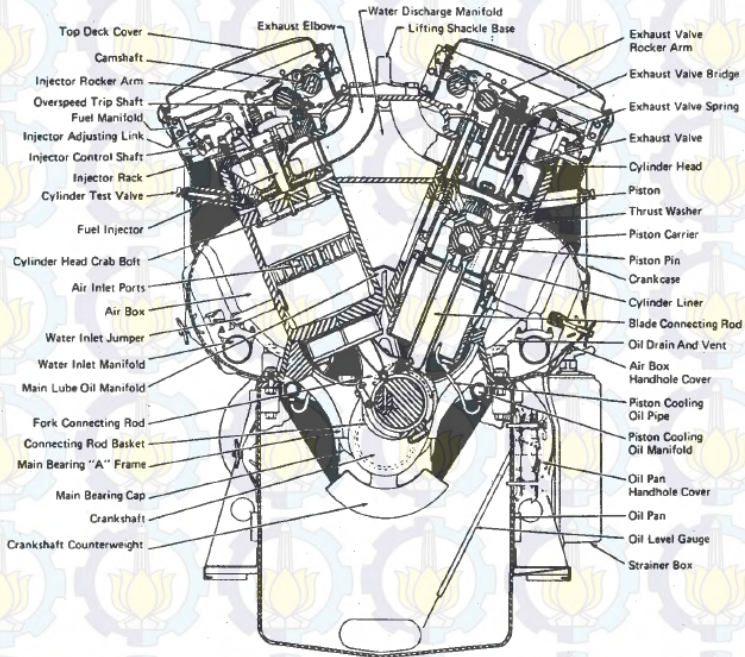
2.1 Umum

Sejak ditemukan pertama kali pada tahun 1898 motor diesel sudah banyak melalui perkembangan dan modifikasi untuk mengatasi kekurangan dan menambahkan performa serta keandalan. Menurut Eckert, Stacey, dan Earl (2005) mendesain dengan cara adaptasi dan menggunakan desain yang sudah ada sebagai referensi dapat mengurangi berbagai masalah kompleks yang mungkin akan dihadapi jika mendesain dari awal.

Berbeda dengan pengembangan produk yang bersifat tradisional, *reverse engineering* dimulai dengan meniru produk yang ada dan dijadikan referensi, seperti meniru bentuk dan keunggulan teknologi dari produk tersebut yang nantinya akan langsung diproduksi atau menjadi *prototype* (Bagci, 2009). Dalam membuat desain tentunya tidak sepenuhnya meniru produk yang sudah ada, melainkan melakukan beberapa perubahan yang dianggap perlu dan membuat produk tersebut lebih baik daripada produk yang sudah ada. Eckert, Clarkson, dan Zanker (2004) mengatakan merubah desain yang sudah ada selain bertujuan untuk mengikuti kebutuhan dari industri yaitu untuk menghilangkan kekurangan yang ada pada produk tersebut. Dalam mendesain ulang komponen dan mendapatkan pemecahan masalah dari kekurangan yang ada perlu untuk melihat desain secara mendetil dari komponen asli, dan akibatnya pada komponen lain ketika komponen tersebut dimodifikasi.

Produk yang sudah ada dijadikan sebagai titik awal untuk mendesain produk yang baru dengan beberapa komponen dari produk lama dapat digunakan pada produk yang baru. Hal ini juga dilakukan oleh pabrik motor diesel Perkins ketika akan mendesain motor diesel baru (Eckert, Stacey, dan Earl, 2005).

Banyak sekali aspek penting dalam mendesain motor diesel sesuai dengan kebutuhan dan penggunaannya, setiap komponen harus didesain dengan baik. Komponen utama dari motor bakar dalam diantaranya adalah silinder blok, camshaft, connecting rod, crankcase, crankshaft, silinder liner, silinder head, piston, turbocharger, & supercharger. (Pulkrabek, 2004).



Gambar 2.1 Bagian-bagian Motor Diesel
(Sumber: Heywood, 1988)

2.2 Silinder Head

Silinder head adalah salah satu komponen yang penting dan kompleks dari motor bakar dalam. Merupakan bagian dari ruang bakar, katup masuk dan katup buang dengan *valve seats*

dan *valve guides*, injektor, dan sistem pendingin (Rao, 2010). Bentuk dan bagian-bagian dari silinder head pada motor diesel dapat dilihat pada gambar 2.1.

Silinder head menutup silinder liner, dibuat dari besi cor atau aluminium, harus kuat supaya dapat menerima tekanan dari pembakaran. Pada silinder head terdapat *spark plug* pada *spark ignition engines*, injektor bahan bakar pada *compression ignition engines*, dan pada *overhead valve engine* terdapat mekanisme buka tutup katup (Heywood, 1988). Silinder head memiliki fungsi lain selain sebagai komponen yang membatasi ruang bakar, seperti dijelaskan oleh Gedeon (2012) silinder head pada motor diesel memiliki beberapa fungsi. Pertama, penutup dari silinder liner. Kedua, menjadi struktur yang menopang katup buang dan katup masuk (jika ada), injektor, dan beberapa komponen lain yang dibutuhkan.

2.3 Tegangan

Tegangan timbul akibat adanya berbagai macam gaya dari luar benda, beberapa diantaranya adalah tekanan, tarikan, dan pembengkokan. Pada pembebanan tarik terjadi tegangan tarik, pada pembebanan tekan terjadi tegangan tekan, begitu pula pada pembebanan yang lain. Menurut James dan Stephen (1997) tegangan dan regangan adalah merupakan konsep yang paling dasar dalam mekanika bahan. Konsep ini dapat diilustrasikan dalam bentuk yang paling mendasar dengan meninjau sebuah batang prismatis yang mengalami gaya aksial. Batang prismatis adalah sebuah elemen struktural lurus yang mempunyai penampang konstan di seluruh panjangnya, sedangkan gaya aksial adalah beban yang mempunyai arah sama dengan sumbu elemen, sehingga mengakibatkan terjadinya tarikan atau tekanan pada batang.

Zainuri (2008) menjelaskan tegangan mekanik dapat dihitung dengan rumusan gaya per satuan luas, dirumuskan seperti pada persamaan 2.1.

$$S = P / A \quad (2.1)$$

Dimana S : Tegangan rata-rata (Pa, MPa)

P : Beban atau gaya luar (N, kgf)

A : Luas penampang (m^2 , mm^2)

Sedangkan definisi dari tegangan normal adalah intensitas gaya yang bekerja normal (tegak lurus) terhadap irisan yang mengalami tegangan. Tegangan normal ini dapat berupa :

1. Tegangan tarik (*tensile stress*)
Apabila sebuah batang ditarik dengan gaya sebesar P, maka batang tersebut mengalami tegangan tarik.
2. Tegangan tekan (*compressive stress*)
Apabila sebuah batang mengalami gaya yang bersifat mendorong batang, maka batang tersebut mengalami tegangan tekan.

Menurut Gere (2004) beban eksternal bukanlah satu-satunya penyebab adanya tegangan, salah satu penyebab lain adalah kenaikan temperatur. Perubahan temperatur menyebabkan ekspansi dari struktur material yang dapat menyebabkan *strain* (regangan) dan *stress* (tegangan). Untuk struktur menghitung *strain* dari struktur material dapat menggunakan persamaan 2.2.

$$\varepsilon_T = \alpha (\Delta T) \quad (2.2)$$

Dimana ε_T : Thermal strain

α : Koefisien Ekspansi Thermal ($\mu m/(m.K)$)

ΔT : Perubahan temperatur ($^{\circ}C$)

Persamaan regangan yang diakibatkan oleh pengaruh beban mekanis dapat dirumuskan dengan persamaan 2.3.

$$\varepsilon = \sigma / E \quad (2.3)$$

Dari persamaan 2.2 ketika disubstitusikan dengan persamaan 2.3 untuk mencari regangan mekanis maka rumusnya akan menjadi

$$\sigma_T = E\alpha (\Delta T) \quad (2.4)$$

Dimana σ_T : Tegangan thermal (MPa, Pa)

σ : Tegangan (MPa, Pa)

E : Modulus elastisitas (GPa)

ΔT : Perubahan temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

Persamaan 2.4 adalah rumus untuk mencari besarnya tegangan akibat dari pengaruh temperatur pada material (*thermal stress*).

2.4 Finite Element Analysis

Silinder head merupakan komponen dari motor diesel yang bersinggungan langsung dengan ruang bakar, yang terkena tekanan dan temperatur tinggi dari pembakaran. Salah satu faktor yang berpengaruh terhadap besarnya tegangan yang terjadi pada silinder head adalah material yang digunakan, setiap material memiliki kandungan kimia dan *properties* yang berbeda-beda. *Properties* dari material yang berdampak banyak pada tegangan adalah tensile strength, yield strength, hardness, konduktivitas thermal, dan *properties* material lainnya. Menurut Tripathi, Prakash, Singh, dan Dwivedi (2014) diperlukan adanya prediksi yang akurat tentang tegangan dan regangan dalam mendesain motor bakar dalam, supaya dapat menentukan ukuran, bentuk, dan material yang digunakan secara optimal.

Tegangan yang dapat terjadi pada silinder head adalah tegangan mekanik dan tegangan thermal, dimana tegangan mekanik diakibatkan oleh tekanan dan tegangan thermal diakibatkan oleh temperatur dari ruang bakar. Li, Mao, dan Wang (2008) mengatakan bahwa penelitian tentang thermal stress yang

terjadi pada cylinder head adalah hal yang penting, khususnya pada daerah antara lubang katup masuk dan katup buang, karena pada daerah itu sering terjadi *crack*. Selain menganalisa bentuk asli dari silinder head juga dapat dilakukan modifikasi bentuk, dianalisa kembali lalu dibandingkan hasil antara sebelum dan sesudah modifikasi. Paratwar dan Hulwan (2013) menjelaskan melakukan analisa perpindahan panas pada silinder head adalah hal yang penting, utamanya perpindahan panas karena air pendingin. Karena jika terjadi kegagalan pada sistem pendingin maka akan terjadi *overheating* yang dapat menyebabkan *crack* pada silinder head.

Menghindari berbagai macam kegagalan ketika beroperasi adalah salah satu tujuan dalam mendesain motor diesel. Hasil desain dari motor diesel dibutuhkan adanya tes pada kondisi saat beroperasi (Tichánek, M. Španiel, M. Diviš, 2005). Biaya yang mahal dari membuat *prototype* membuat pemodelan simulasi dengan metode elemen hingga (FEM) lebih banyak digunakan oleh desainer. Metode Elemen Hingga, Finite Element Method (FEM) atau disebut juga Finite Element Analysis (FEA) adalah teknik komputasi yang digunakan untuk mendapatkan pendekatan solusi dari permasalahan nilai batas (*boundary value problems*) dalam rekayasa. Secara sederhana, masalah nilai batas adalah masalah matematika di mana satu atau lebih variabel harus memenuhi persamaan diferensial dimanapun dalam satu domain yang diketahui dari variabel independen dan memenuhi kondisi tertentu pada batas domain (Hutton, 2004).

Silinder head umumnya memiliki bentuk yang cukup rumit, utamanya pada silinder head dari motor diesel yang memiliki silinder lebih dari satu. Mecitoglu (2008) menjelaskan solusi perhitungan yang bersifat analitis hanya bisa dilakukan jika geometri, beban, dan *boundary conditions* dari benda tidak terlalu rumit. Maka dari itu lebih disarankan untuk menggunakan pendekatan numerik seperti FEM. Roylance (2001) juga mengatakan bahwa solusi numerik untuk permasalahan tegangan

yang cukup rumit sekalipun dapat diselesaikan dengan finite element analysis.

Metode elemen hingga (*finite element method*) banyak memberikan andil dalam melahirkan penemuan-penemuan bidang riset dan industri, hal ini dikarenakan dapat berperan sebagai *research tool* pada eksperimen numerik. Aplikasi banyak dilakukan pada problem kompleks diselesaikan dengan metode elemen hingga seperti rekayasa struktur, *steady state* dan time dependent heat transfer, fluid flow (Sonief, 2003).

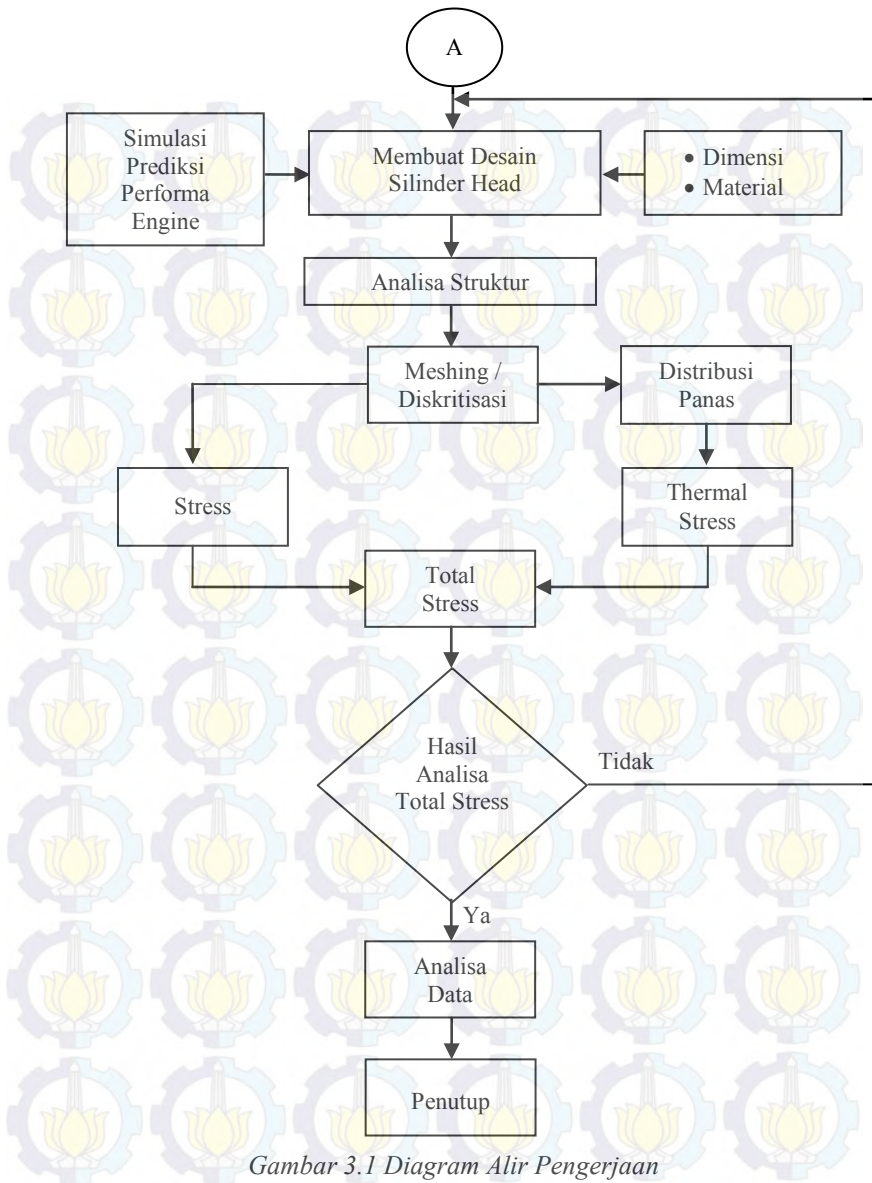


BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Silinder head yang didesain pada penelitian ini dibuat dengan metode *reverse engineering*, dimana telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Perlu adanya alur dan prosedur untuk pengerjaan supaya sesuai dengan harapan dan selesai pada saat yang telah ditentukan. Diagram alur pengerjaan bisa dilihat pada gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan

3.1 Membongkar dan Mengidentifikasi Mesin

Untuk dapat mengetahui bentuk dan dimensi dari silinder head maka dilakukan pembongkaran pada motor diesel. Setelah semua komponen dari motor diesel dibongkar maka akan dilakukan pengukuran secara detail menggunakan jangka sorong dan mikrometer sekrup. Hasil dari pengukuran ditulis pada lembar yang sudah disiapkan sebelumnya. Penulisan pengukuran tidak sebatas hanya pada ukuran bagian dari silinder head, melainkan juga posisi dari setiap bagian dilihat dari titik acuan yang telah ditentukan.

Beberapa data dari motor diesel yang akan diteliti juga dikumpulkan melalui buku panduan yang tersedia. Data yang bisa dicari dari *manual book* adalah ukuran utama dari motor diesel seperti bore, stroke, serta data lain seperti *compression ratio*.

3.2 Membuat Draft Rancangan Desain Silinder Head

Setelah pembongkaran dan pengukuran pada silinder head diselesaikan, langkah selanjutnya akan dilakukan membuat rancangan secara umum dari silinder head yang akan didesain. Untuk spesifikasi motor diesel dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor Diesel Yang Akan Didesain

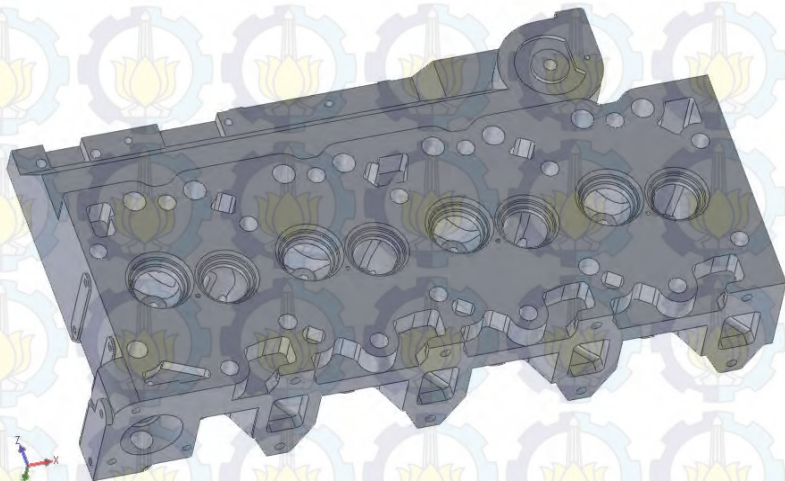
Rated Power	125 hp @2200 rpm
Bore	102 mm
Stroke	120 mm
Compression Ratio	1:16,5
Displacement Volume	3,9 Liter
Number of Cylinder	4 Cylinder
Number of Valve	8 Valve
Cooling System	Water-cooled

Setelah desain umum dan spesifikasi dari motor diesel telah ditentukan selanjutnya merancang draft desain dari silinder

head, rancangan yang dimaksud adalah desain berupa bentuk secara umum, ukuran, serta modifikasi apa yang akan dilakukan pada silinder head tersebut. Dalam pembuatan draft desain ini banyak dipengaruhi oleh bentuk asli serta dimensi dari silinder yang sebenarnya, selain itu juga menyesuaikan dengan dimensi yang telah ditentukan pada komponen lain seperti silinder blok supaya tidak ada perbedaan ukuran setelah dilakukan modifikasi.

3.3 Membuat Desain Silinder Head

Tahap berikutnya setelah ukuran detail dari silinder telah diukur dan dicatat adalah melakukan penggambaran dalam bentuk tiga dimensi. Desain silinder head merupakan hasil penggambaran tiga dimensi dari draft desain yang telah dibuat sebelumnya. Penggambaran disesuaikan dengan komponen lain yang juga berkaitan dengan silinder head, seperti silinder liner, silinder blok, injektor, dan valve.



Gambar 3.2 Desain Silinder Head

Material memiliki karakteristik serta ketahanan terhadap panas dan tekanan yang berbeda-beda, kesalahan dalam memilih material akan mengakibatkan silinder head yang tidak mampu menahan tekanan dan temperatur hasil dari pembakaran. Untuk pemilihan material dilakukan dengan cara mencari referensi material dari silinder head pada paper serta penelitian-penelitian yang sudah ada sebelumnya untuk motor diesel 4 silinder 125 hp. Material yang digunakan pada silinder head adalah Cast Iron dan Aluminium Alloy, material yang digunakan dijelaskan dibawah ini:

Material	: Cast Iron EN-GJL-250 (Lamellar Graphite Iron)
DIN Standard	: GG25
Tensile Strength	: 250 – 350 MPa
0,1% Yield Strength	: 165 – 228 MPa
Density	: 7,2 gr/cm ³
Hardness	: 190 – 240 HBS
Modulus of Elasticity	: 100 – 130 GPa
Elongation	: 0,3 – 0,8%
Poisson Ratio	: 0,26
Thermal Conductivity	: 46,5 W/(K.m) @ 300°C
Thermal Expansion	: 13 µm/(m.K)
Specific Heat Capacity	: 0,535 J/(g.K)

Material	: Cast Iron EN-GJV-450 (Vermicular Graphite Iron)
DIN Standard	: GGV45
Tensile Strength	: 450 – 525 MPa
0,2% Yield Strength	: 315 – 365 MPa
Density	: 7,1 gr/cm ³
Hardness	: 200 - 250 HBS
Modulus of Elasticity	: 145 – 155 GPa
Elongation	: 1,0 – 2,5%
Poisson Ratio	: 0,27
Thermal Conductivity	: 38 W/(K.m) @ 400°C

Thermal Expansion : 11 $\mu\text{m}/(\text{m.K})$

Specific Heat Capacity : 0,475 J/(g.K)

Material : Cast Iron EN-GJS-1200
(Austempered Ductile Iron)

DIN Standard : ADI1200

Tensile Strength : 1200 MPa

0,1% Yield Strength : 850 MPa

Density : 7,1 gr/cm^3

Hardness : 340 – 440 HBS

Modulus of Elasticity : 167 GPa

Elongation : 2%

Poisson Ratio : 0,27

Thermal Conductivity : 21,5 W/(K.m)

Thermal Expansion : 14 $\mu\text{m}/(\text{m.K})$

Specific Heat Capacity : 0,515 J/(g.K)

Material : Aluminium Casting Alloy - AlSi₇Mg

DIN Standard : G-AlSi₇Mg

Tensile Strength : 180 – 290 MPa

0,2% Yield Strength : 90 – 210 MPa

Density : 2,68 gr/cm^3

Hardness : 55 – 90 HBS

Modulus of Elasticity : 75 GPa

Elongation : 2%

Poisson Ratio : 0,33

Thermal Conductivity : 160 W/(K.m)

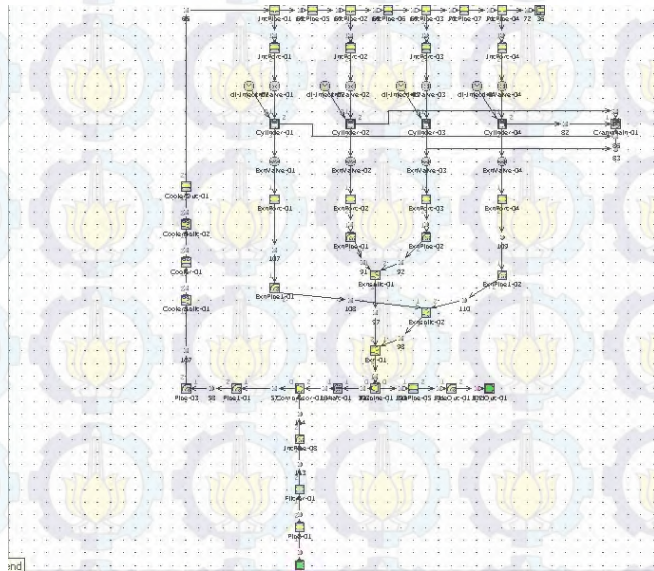
Thermal Expansion : 21,5 $\mu\text{m}/(\text{m.K})$

Specific Heat Capacity : 0,965 J/(g.K)

3.4 Analisa Struktur

Analisa struktur merupakan riset utama yang dilakukan dalam skripsi ini, yaitu simulasi software untuk mengetahui stress yang terjadi pada silinder head akibat dari tekanan dan temperatur

pada ruang bakar. Data yang didapat dari engine seperti panjang stroke, diameter dari bore, diameter dari pipa inlet dan outlet dari saluran udara masuk dan saluran udara buang, serta data-data dari buku panduan dimasukkan pada software untuk dilakukan simulasi prediksi performa engine. Dari simulasi tersebut akan mendapatkan *output* berupa data yang dibutuhkan untuk penelitian ini, diantaranya adalah besarnya tekanan serta temperatur ruang bakar pada putaran tertentu, besarnya koefisien konveksi didapat sebesar $6493 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.



Gambar 3.3 Simulasi Prediksi Performa Engine

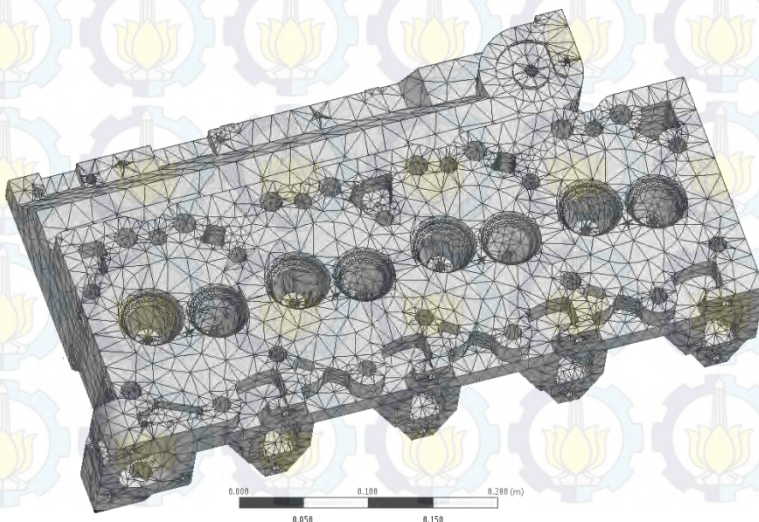
Dari simulasi tersebut akan mendapatkan *output* berupa data yang dibutuhkan untuk penelitian ini. Data yang didapatkan dari simulasi yaitu untuk temperatur maksimal dari dinding silinder head adalah sebesar $296,85^\circ\text{C}$ dan hasil simulasi berupa tekanan pembakaran maksimum sebesar 128,4467 bar yang lebih jelasnya dapat dilihat pada lampiran D dan lampiran E.

3.4.1 Diskritisasi / Meshing

Hasil desain cylinder head yang dibuat telah dibuat sebelumnya tidak bisa langsung dilakukan simulasi menggunakan software. Sebelum simulasi pada geometri dilakukan meshing terlebih dahulu, dimana pengertian meshing adalah proses membagi geometri yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil. Pembagian mesh yang semakin banyak atau ukurannya semakin kecil akan menghasilkan hasil simulasi yang lebih akurat namun akan membutuhkan iterasi yang lebih banyak sehingga memakan waktu simulasi yang lebih lama.

Tabel 3.2. Tabel Data Dari Mesh

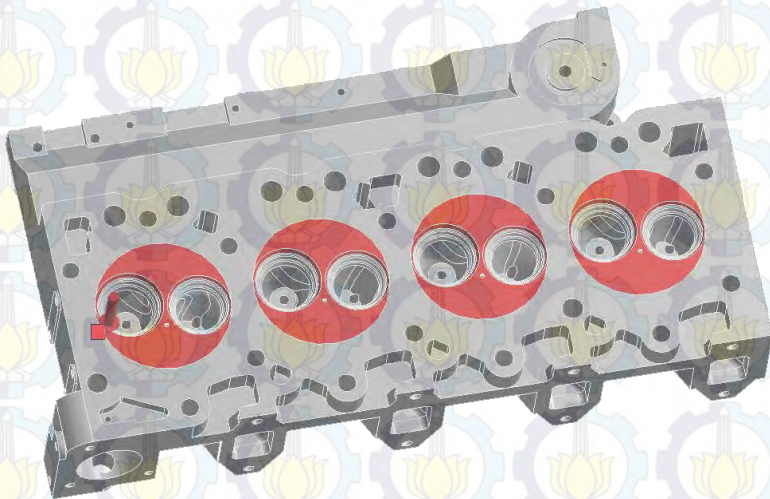
Relevance Center	Medium
Element Size	Default
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Medium
Minimum Edge Length	5.0431×10^{-8} m



Gambar 3.4 Desain Silinder Head Setelah Dilakukan Meshing

3.4.2 Simulasi Distribusi Panas

Untuk mendapatkan thermal stress atau tegangan yang diakibatkan oleh temperatur perlu dilakukan simulasi distribusi panas yang terjadi pada silinder head, dimana simulasi ini bertujuan untuk mengetahui berapa besar temperatur pada setiap bagian dari silinder head, termasuk temperatur tertinggi dan terendah. Langkah yang dilakukan adalah menentukan *ambient temperature* atau suhu kondisi sekitar yang di asumsikan sebesar 22 derajat celcius, lalu menentukan temperatur rata-rata dari permukaan silinder head yang terkena temperatur tinggi dari pembakaran pada ruang bakar dan melakukan input temperatur yaitu sebesar 296,85 derajat celcius. Untuk temperatur dinding jalur pendingin silinder head diasumsikan sebesar 84 derajat celcius.



Gambar 3.5 Input Tekanan dan Temperatur Akibat Pembakaran Pada Permukaan Silinder Head Untuk Simulasi

3.4.2 Thermal Stress Analysis

Simulasi thermal stress bertujuan untuk mengetahui seberapa besar tegangan yang terjadi pada silinder head akibat dari temperatur tinggi dari pembakaran pada ruang bakar. Data

hasil dari simulasi distribusi temperatur kemudian dimasukkan pada simulasi *static structural*.

3.4.2 Pressure Stress Analysis

Selain simulasi tegangan yang diakibatkan oleh temperatur, dilakukan juga simulasi tegangan yang diakibatkan oleh tekanan yang dihasilkan oleh pembakaran pada ruang bakar. Hasil simulasi berupa gambar tiga dimensi yang berwarna, dimana warna pada simulasi ini menunjukkan sebaran tegangan yang terjadi. Sesuai dengan hasil simulasi prediksi performa kinerja motor diesel tekanan pembakaran adalah sebesar 128,4467 bar, untuk bagian silinder head yang terkena tekanan sama dengan permukaan yang terkena panas dari pembakaran dan bisa dilihat pada gambar 3.5.

3.4.2 Total Stress

Total stress merupakan tegangan hasil gabungan dari tegangan yang diakibatkan oleh temperatur dan tekanan. Setelah disimulasikan secara individu, pada tahap ini akan dilakukan simulasi yang melibatkan temperatur dan tekanan.

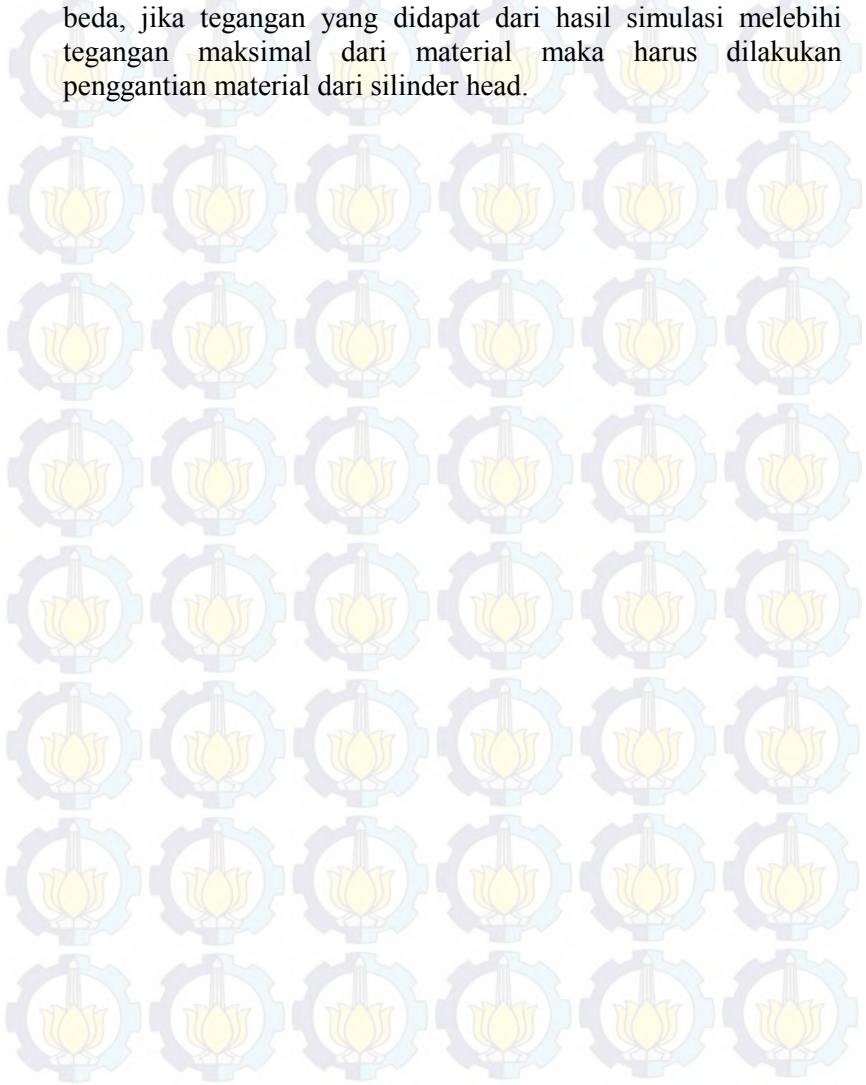


Gambar 3.6 Bagan Urutan Simulasi Total Stress

3.5 Analisa Data

Pada tahap ini akan ada penjelasan mengenai kesimpulan dari analisa yang telah dilakukan pada penelitian ini. Hal yang disimpulkan adalah pengaruh dari tegangan yang terjadi akibat tekanan dan temperatur pada material silinder head, serta dilakukan pengecekan tegangan yang terjadi apakah masih bisa

ditahan oleh material yang dipilih sebelumnya, karena setiap material memiliki ketahanan terhadap tegangan yang berbeda-beda, jika tegangan yang didapat dari hasil simulasi melebihi tegangan maksimal dari material maka harus dilakukan penggantian material dari silinder head.





“halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

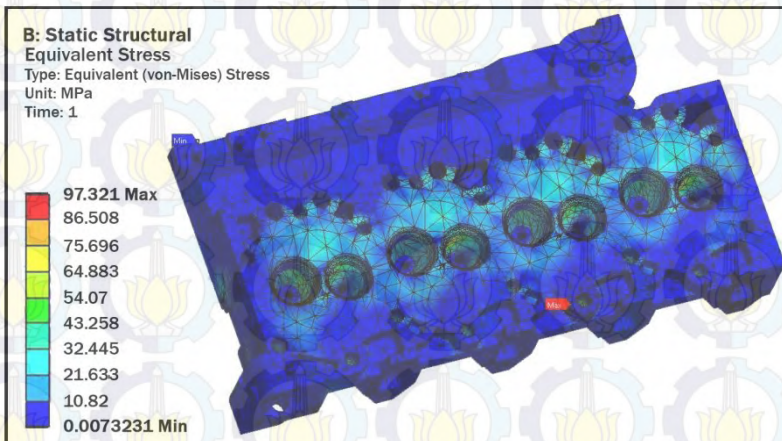
ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab berikut akan dijelaskan hasil simulasi dari tegangan akibat dari tekanan, dan tegangan akibat dari temperature, dan tegangan total yang dilakukan pada beberapa material yang berbeda.

4.1 Tegangan Akibat Tekanan Pembakaran

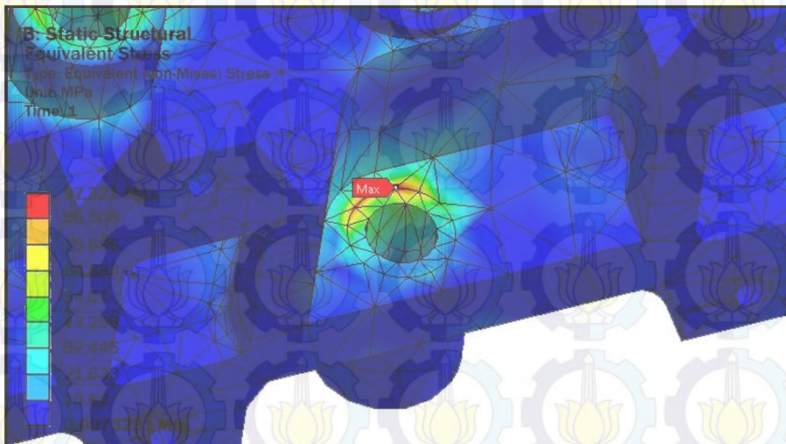
4.1.1 Cast Iron EN-GJL-250

Gambar 4.1 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan pada silinder head yang menggunakan material Cast Iron EN-GJL-250. Sesuai dengan hasil simulasi prediksi performa engine, tekanan pembakaran terbesar adalah sebesar 128,4 bar, dan dari simulasi distribusi tegangan didapatkan nilai terbesar adalah sebesar 97,321 MPa dan nilai tegangan terkecil sebesar 0,0073231 MPa.



*Gambar 4.1 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Pada Silinder Head
Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250*

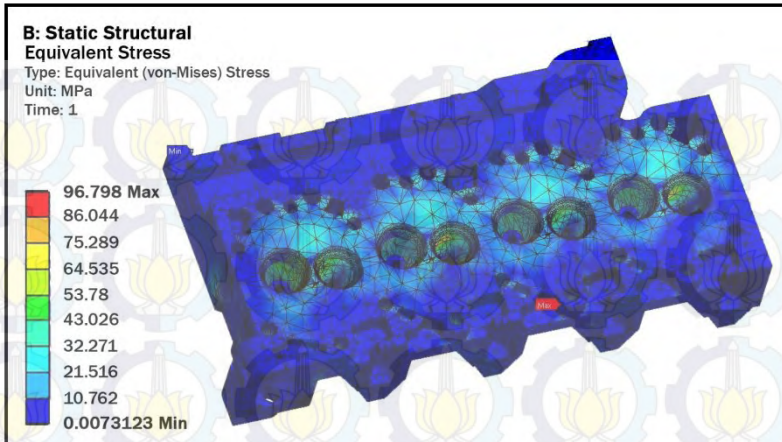
Hasil dari distribusi tegangan cukup besar pada permukaan silinder head yang terkena tekanan pembakaran, dan tegangan terbesar terjadi pada bagian silinder head yang ditahan oleh baut, dan tegangan yang paling kecil terdapat pada bagian sisi lubang udara masuk pada silinder head yang menempel pada intercooler. Untuk tegangan tertinggi dapat ditandai dengan tanda panah merah pada gambar 4.2.



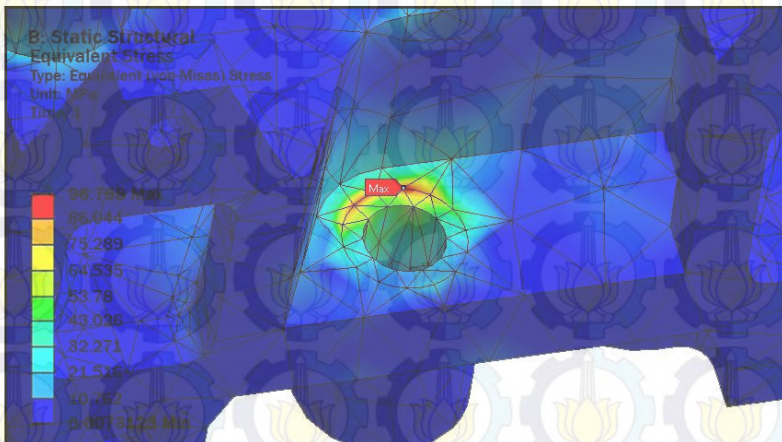
Gambar 4.2 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250

4.1.2 Cast Iron EN-GJV-450

Gambar 4.3 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan pada silinder head yang menggunakan material Cast Iron EN-GJV-450, material yang gradenya lebih tinggi jika dibanding dengan EN-GJL-250. Sesuai dengan hasil simulasi prediksi performa engine, tekanan pembakaran terbesar adalah sebesar 128,4 bar, dan dari simulasi distribusi tegangan didapatkan nilai terbesar adalah sebesar 96,798 MPa dan nilai tegangan terkecil sebesar 0,0073123 MPa.



Gambar 4.3 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJV-450

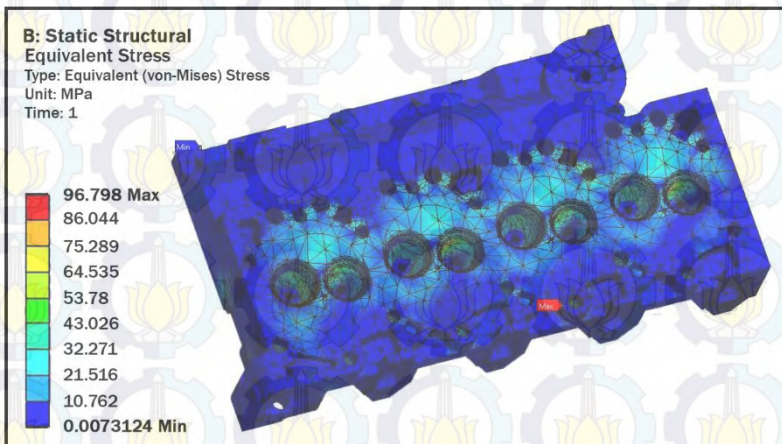


Gambar 4.4 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJV-450

Hasil tegangan terbesar terjadi pada bagian silinder head dengan material EN-GJV-450 adalah pada bagian yang ditahan oleh baut seperti yang ditandai dengan tanda panah merah pada gambar 4.4.

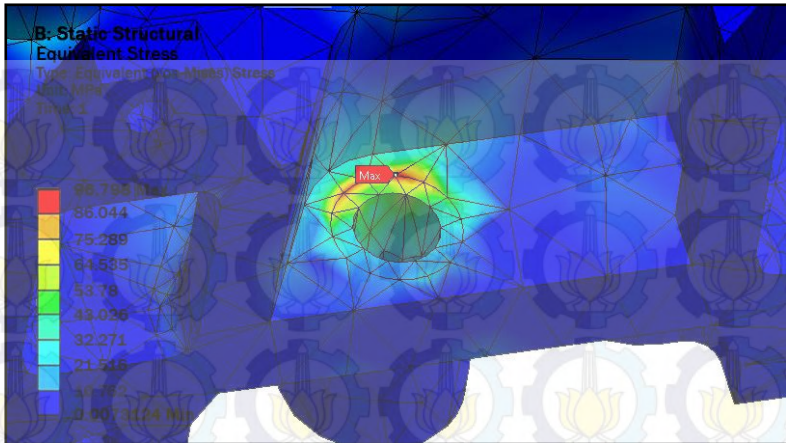
4.1.4 Cast Iron EN-GJS-1200

Gambar 4.5 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan pada silinder head yang menggunakan material Cast Iron EN-GJS-1200. Sesuai dengan hasil simulasi prediksi performa engine, tekanan pembakaran terbesar adalah sebesar 128,4 bar, dan dari simulasi distribusi tegangan didapatkan nilai terbesar sebesar 96,798 MPa dan nilai tegangan terkecil sebesar 0,0073124 MPa.



Gambar 4.5 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200

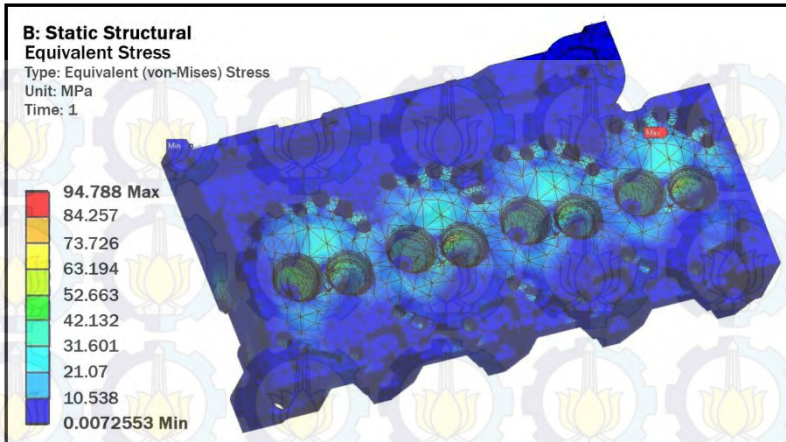
Hasil tegangan terbesar terjadi pada bagian silinder head dengan material EN-GJS-1200 adalah pada bagian yang ditahan oleh baut seperti yang ditandai dengan tanda panah merah pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200

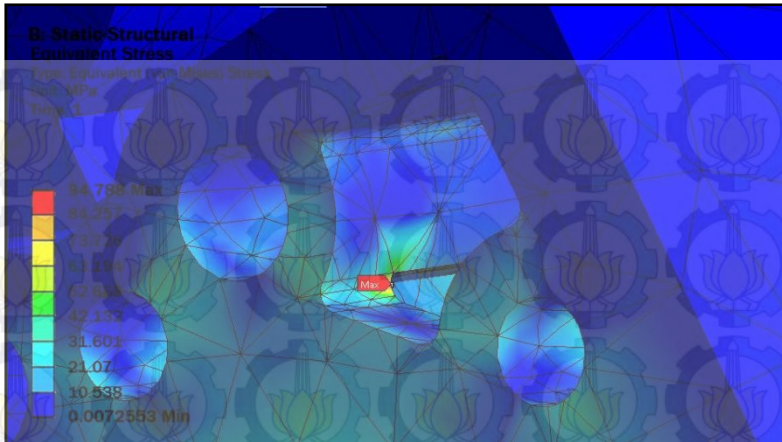
4.1.3 Aluminium Alloy AlSi₇Mg

Gambar 4.7 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan pada silinder head yang menggunakan material Aluminium Alloy AlSi₇Mg. Sesuai dengan hasil simulasi prediksi performa engine, tekanan pembakaran terbesar adalah sebesar 128,4 bar, dan dari simulasi distribusi tegangan didapatkan nilai terbesar adalah sebesar 94,788 MPa dan nilai tegangan terkecil sebesar 0,0072553 MPa.



Gambar 4.7 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Pada Silinder Head Dengan Material Aluminium Alloy AlSi7Mg

Hasil dari distribusi tegangan cukup besar pada permukaan silinder head yang terkena tekanan pembakaran, berbeda dengan silinder head yang menggunakan material cast iron, silinder head dengan menggunakan material ini tegangan terbesar justru terjadi pada lubang pendingin yang ditandai dengan tanda panah merah pada gambar 4.8, dan tegangan yang paling kecil terdapat pada bagian sisi lubang udara masuk pada silinder head yang menempel pada intercooler. Untuk tegangan tertinggi dapat ditandai dengan tanda panah merah pada gambar 4.8.



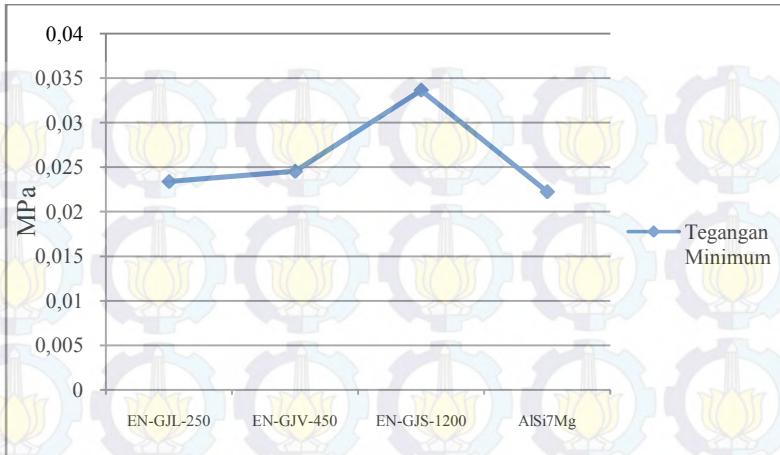
Gambar 4.8 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Aluminium Alloy AlSi₇Mg

4.1.5 Analisa Tegangan Akibat Tekanan Pembakaran

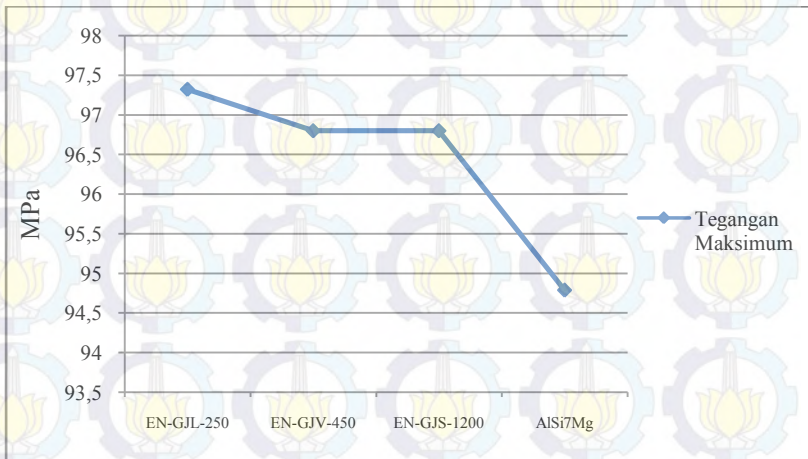
Dari simulasi static stress pada software didapatkan hasil tegangan dari beberapa material yang disimulasikan, dan didapatkan tabel serta grafik yang menunjukkan perbedaan tegangan yang terjadi akibat tekanan pembakaran pada silinder head dengan beberapa variasi material. Perbandingan tegangan pada silinder head dapat dilihat pada tabel 4.1 dan grafik 4.1.

Tabel 4.1 Tabel Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Akibat Tekanan Pembakaran

Material	Intensitas Tegangan Minimum (MPa)	Intensitas Tegangan Maksimum (MPa)
Cast Iron EN-GJL-250	0,0073231	97,321
Cast Iron EN-GJV-450	0,0073123	96,798
Cast Iron EN-GJS-1200	0,0073124	96,798
Aluminium Alloy AlSi ₇ Mg	0,0072553	94,788



Grafik 4.1 Grafik Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Minimum Akibat Tekanan Pembakaran



Grafik 4.2 Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Maksimum Akibat Tekanan Pembakaran

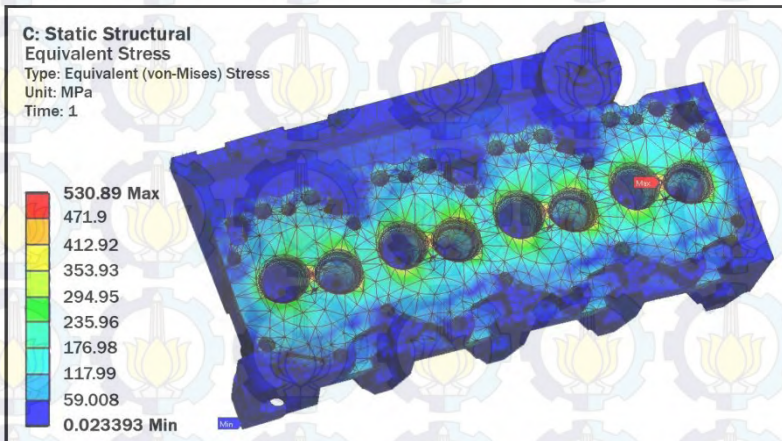
Dari tabel 4.1, grafik 4.1 dan grafik 4.2 dapat dilihat material yang mengalami tegangan maksimum terbesar adalah Cast Iron EN-GJL-250, yaitu sebesar 97,321 Mpa dan material yang

mengalami tegangan maksimum terkecil adalah Aluminium Alloy AlSi_7Mg yaitu sebesar 94,788 MPa. Sedangkan untuk tegangan minimum yang terbesar didapatkan pada silinder head dengan material EN-GJL-250 yaitu sebesar 0,0073231 MPa, dan untuk tegangan minimum terkecil pada material Aluminium Alloy AlSi_7Mg yaitu sebesar 0,0072553 MPa.

4.2 Tension Thermal

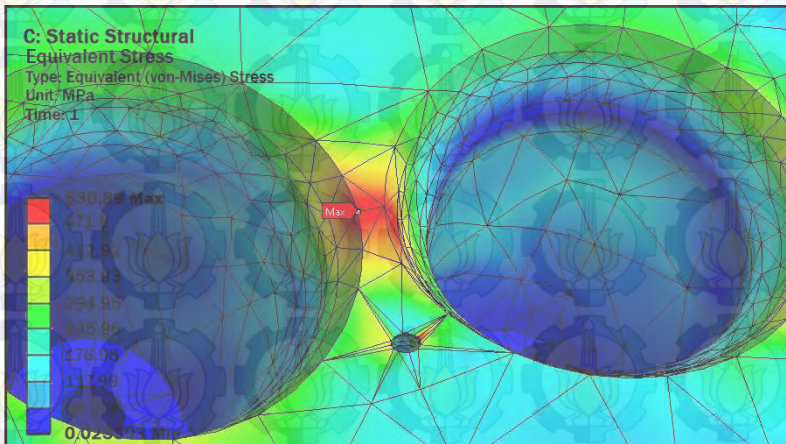
4.2.1 Cast Iron EN-GJL-250

Gambar 4.9 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan akibat temperatur tinggi pada silinder head yang menggunakan material Cast Iron EN-GJL-250. Sesuai dengan hasil simulasi prediksi performa engine, temperatur tertinggi pada permukaan dinding silinder head yang terkena panas dari ruang bakar adalah sebesar $296,85^\circ$ Celcius dan dari simulasi distribusi panas didapatkan temperatur terendah adalah sebesar $82,682^\circ$ Celcius..



Gambar 4.9 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Thermal Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250

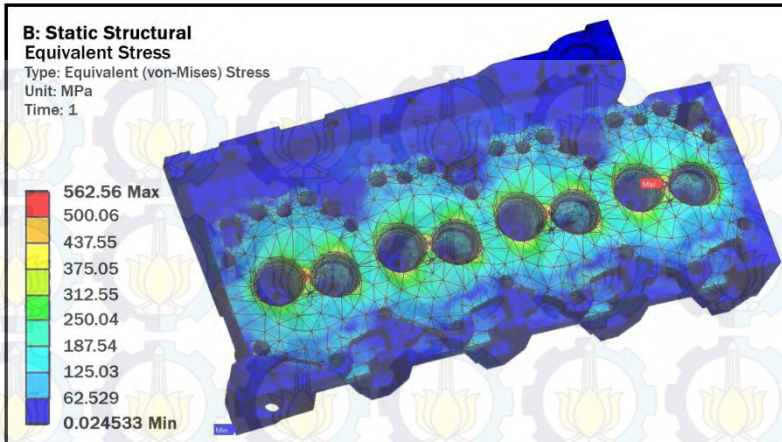
Temperatur tertinggi tentu terdapat pada permukaan silinder head yang terkena langsung panas akibat pembakaran. Hasil dari distribusi tegangan cukup besar pada permukaan silinder head yang terkena panas dari pembakaran pada ruang bakar, dan tegangan terbesar terjadi pada bagian antara valve seat inlet dan outlet. Untuk tegangan tertinggi ditandai dengan panah berwarna merah dan tegangan terkecil ditandai oleh panah berwarna biru pada gambar 4.9 dan 4.10.



Gambar 4.10 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Thermal Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250

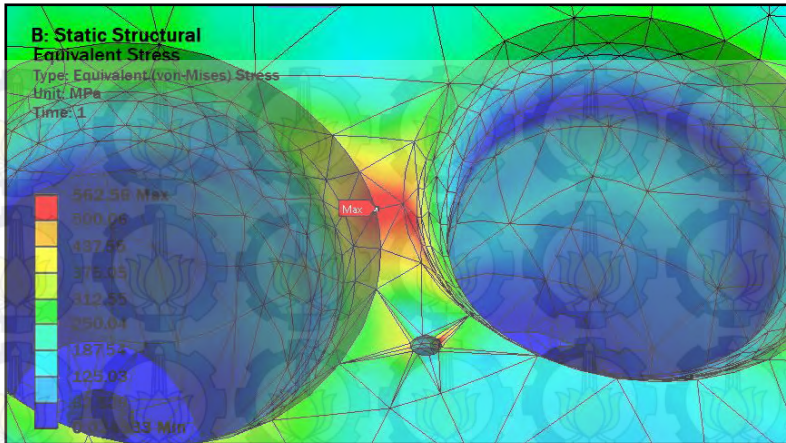
4.2.2 Cast Iron EN-GJV-450

Gambar 4.11 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan akibat temperatur tinggi pada silinder head yang menggunakan material Cast Iron EN-GJV-450. Sesuai dengan hasil simulasi prediksi performa engine, temperatur tertinggi pada permukaan dinding silinder head yang terkena panas dari ruang bakar adalah sebesar 296,85° Celcius dan dari simulasi distribusi panas didapatkan temperatur terendah adalah sebesar 82,682° Celcius.



Gambar 4.10 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Thermal Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJV-450

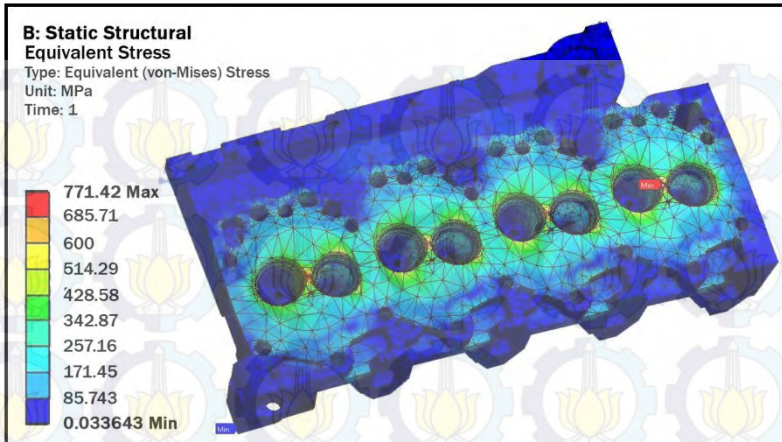
Temperatur tertinggi tentu terdapat pada permukaan silinder head yang terkena langsung panas akibat pembakaran. Hasil dari distribusi tegangan cukup besar pada permukaan silinder head yang terkena tekanan pembakaran, dan tegangan terbesar terjadi pada bagian antara valve seat inlet dan outlet. Untuk tegangan tertinggi ditandai dengan tanda panah berwarna merah dan tegangan terkecil ditandai oleh panah berwarna biru pada gambar 4.10 dan 4.11.



Gambar 4.11 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Thermal Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJV-450

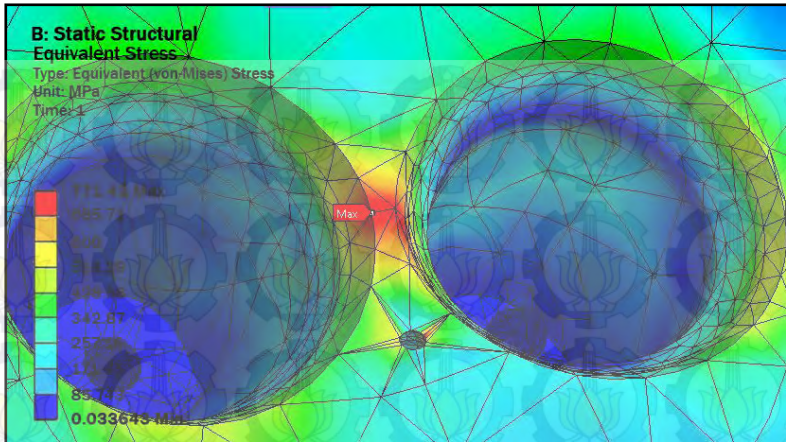
4.2.3 Cast Iron EN-GJS-1200

Gambar 4.12 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan akibat temperatur tinggi pada silinder head yang menggunakan material Cast Iron EN-GJS-1200. Sesuai dengan hasil simulasi prediksi performa engine, temperatur tertinggi pada permukaan dinding silinder head yang terkena panas dari ruang bakar adalah sebesar $296,85^{\circ}$ Celcius dan dari simulasi distribusi panas didapatkan temperatur terendah adalah sebesar $82,682^{\circ}$ Celcius.



Gambar 4.12 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Thermal Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200

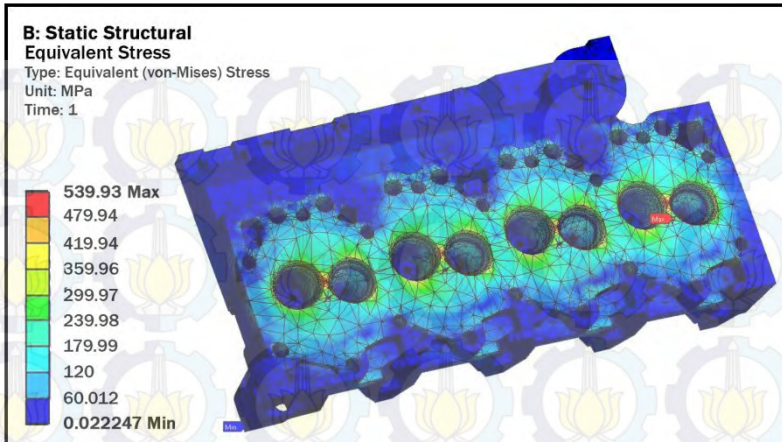
Temperatur tertinggi tentu terdapat pada permukaan silinder head yang terkena langsung panas akibat pembakaran. Hasil dari distribusi tegangan cukup besar pada permukaan silinder head yang terkena tekanan pembakaran, dan tegangan terbesar terjadi pada bagian antara valve seat inlet dan outlet. Untuk tegangan tertinggi ditandai dengan tanda panah berwarna merah dan tegangan terkecil ditandai oleh panah berwarna biru pada gambar 4.12 dan 4.13.



Gambar 4.13 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Thermal Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200

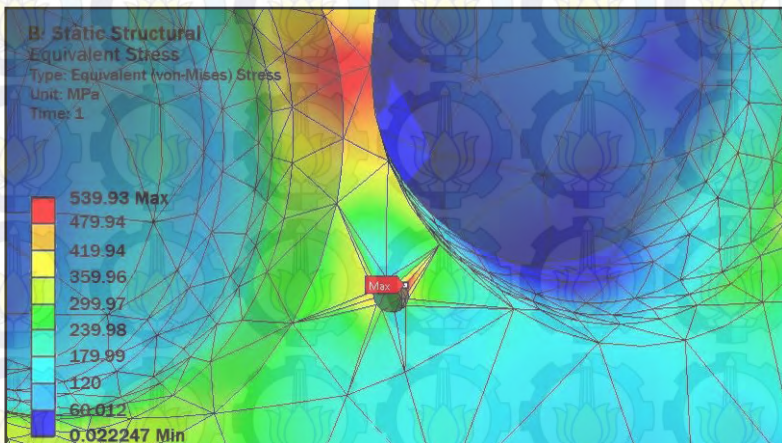
4.2.4 Aluminium Alloy AlSi₇Mg

Gambar 4.14 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan akibat temperatur tinggi pada silinder head yang menggunakan material Aluminium Alloy AlSi₇Mg. Sesuai dengan hasil simulasi prediksi performa engine, temperatur tertinggi pada permukaan dinding silinder head yang terkena panas dari ruang bakar adalah sebesar 296,85° Celcius dan dari simulasi distribusi panas didapatkan temperatur terendah adalah sebesar 82,682° Celcius.



Gambar 4.14 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Thermal Pada Silinder Head Dengan Material Aluminium Alloy AlSi7Mg

Dari gambar 4.15 dapat dilihat tegangan terbesar terjadi pada lubang injektor. Untuk tegangan tertinggi ditandai dengan tanda panah berwarna merah pada gambar 4.15.



Gambar 4.15 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Thermal Tertinggi Pada Silinder Head Dengan Material Aluminium Alloy AlSi7Mg

4.2.5 Analisa Tegangan Thermal

Dari simulasi static stress untuk tegangan thermal pada software didapatkan hasil tegangan dari beberapa material yang disimulasikan, dan didapatkan tabel serta grafik yang menunjukkan perbedaan tegangan yang terjadi akibat temperatur tinggi dari ruang bakar pada silinder head dengan beberapa variasi material. Perbandingan tegangan pada silinder head dapat dilihat pada tabel 4.2 dan grafik 4.2.

Tabel 4.2 Tabel Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Thermal

Material	Intensitas Tegangan Minimum (MPa)	Intensitas Tegangan Maksimum (MPa)
Cast Iron EN-GJL-250	0,023393	530,89
Cast Iron EN-GJV-450	0,024533	562,56
Cast Iron EN-GJS-1200	0,033643	771,42
Aluminium Alloy AlSi7Mg	0,022247	539,93



Grafik 4.3 Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Thermal Minimum



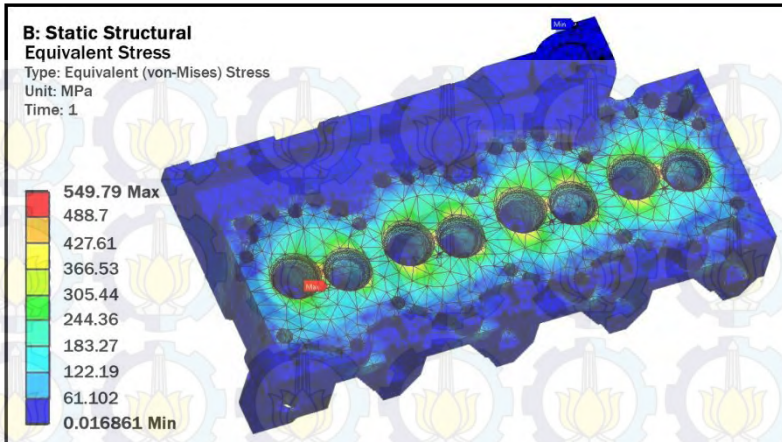
Grafik 4.4 Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Thermal Maksimum

Dari tabel 4.2 dan grafik 4.2 dapat dilihat material yang mengalami tegangan maksimum terbesar adalah Cast Iron EN-GJS-1200, yaitu sebesar 771,42 MPa dan material yang mengalami tegangan maksimum terkecil adalah Cast Iron EN-GJL-250 yaitu sebesar 530,89 MPa. Sedangkan untuk tegangan minimum yang terbesar didapati pada silinder head dengan material Cast Iron EN-GJS-1200 yaitu sebesar 0,033643 MPa, dan untuk tegangan minimum terkecil pada material Aluminium Alloy AlSi₇Mg yaitu sebesar 0,022247 MPa.

4.3 Tegangan Total

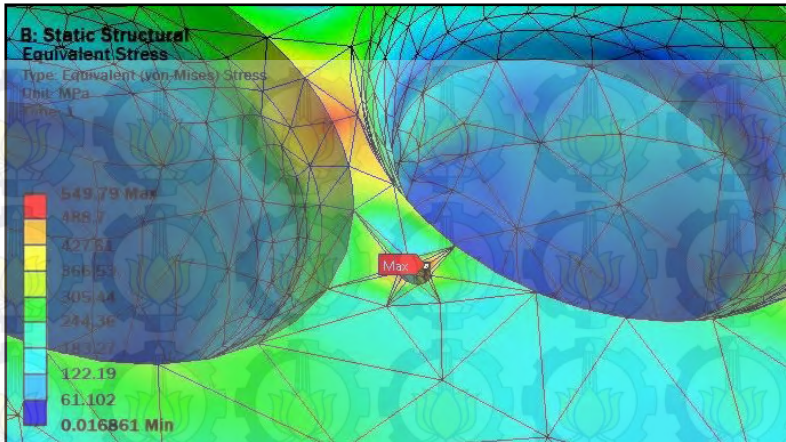
4.3.1 Cast Iron EN-GJL-250

Gambar 4.16 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan total pada silinder head yang menggunakan material Cast Iron EN-GJL-250. Sesuai dengan hasil simulasi static stress yang dilakukan sebelumnya telah didapatkan data tegangan akibat dari tekanan dan temperatur.



Gambar 4.16 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Total Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250

Dari simulasi distribusi tegangan akibat tekanan didapatkan nilai terbesar adalah sebesar 97,321 MPa dan nilai tegangan terkecil sebesar 0,0073231 MPa, dan untuk tegangan thermalnya yang terbesar adalah 530,89 MPa sedangkan yang terkecil adalah 0,023393 MPa, dan didapatkan tegangan total maksimal yang tertinggi sebesar 549,79 MPa dan yang terkecil sebesar 0,016861 MPa. Tegangan total maksimum ditandai dengan tanda panah berwarna merah pada gambar 4.17.

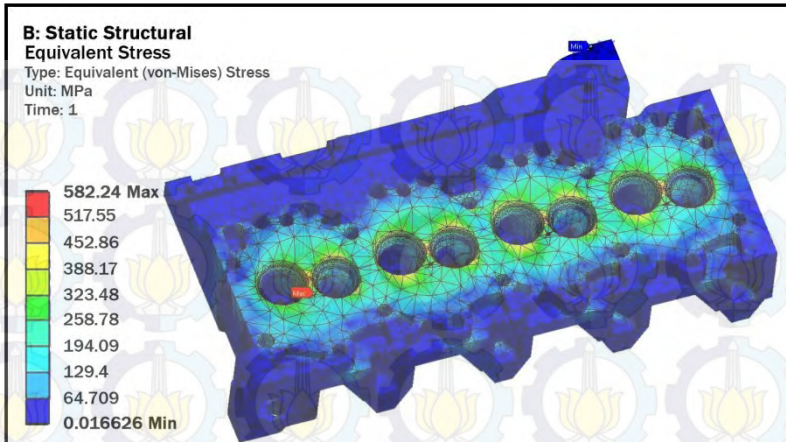


Gambar 4.17 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Total Maksimum Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJL-250

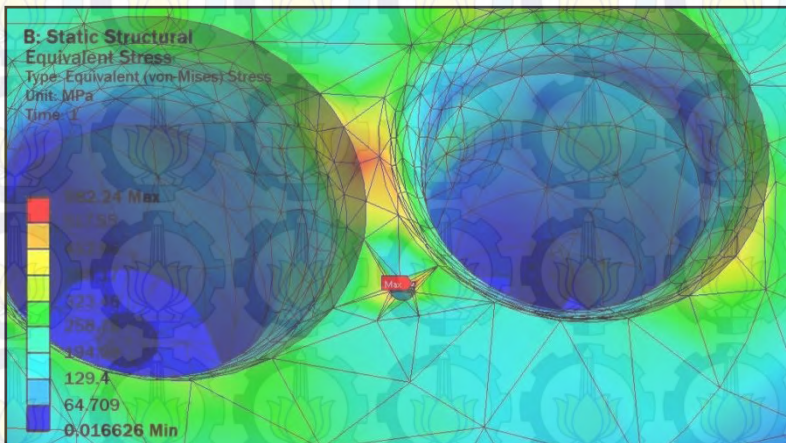
4.3.2 Cast Iron Cast Iron EN-GJV-450

Gambar 4.18 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan total pada silinder head yang menggunakan material Cast Iron Cast Iron EN-GJV-450. Sesuai dengan hasil simulasi static stress yang dilakukan sebelumnya telah didapatkan data tegangan akibat dari tekanan dan temperatur.

Dari simulasi distribusi tegangan akibat tekanan didapatkan nilai terbesar adalah sebesar 96,798 MPa dan nilai tegangan terkecil sebesar 0,0073123 MPa, dan untuk tegangan thermalnya yang terbesar adalah 562,56 MPa sedangkan yang terkecil adalah 0,024533 MPa, dan didapatkan tegangan total maksimal yang tertinggi sebesar 582,24 MPa dan yang terkecil sebesar 0,016626 MPa. Tegangan total maksimum ditandai dengan tanda panah berwarna merah pada gambar 4.19.



Gambar 4.18 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Total Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJV-450

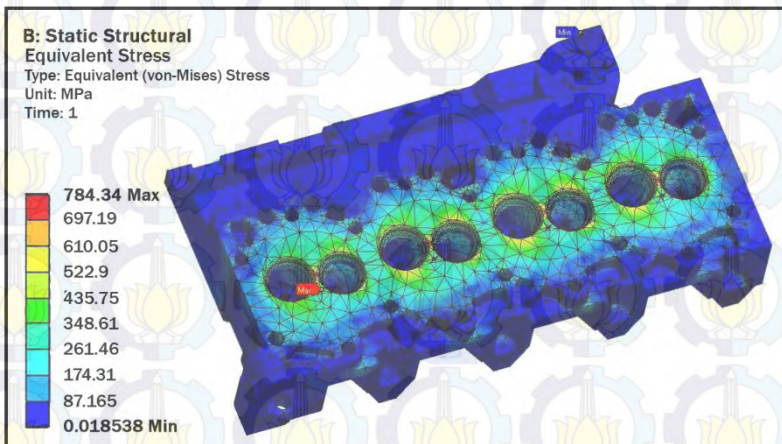


Gambar 4.19 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Total Maksimum Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJV-450

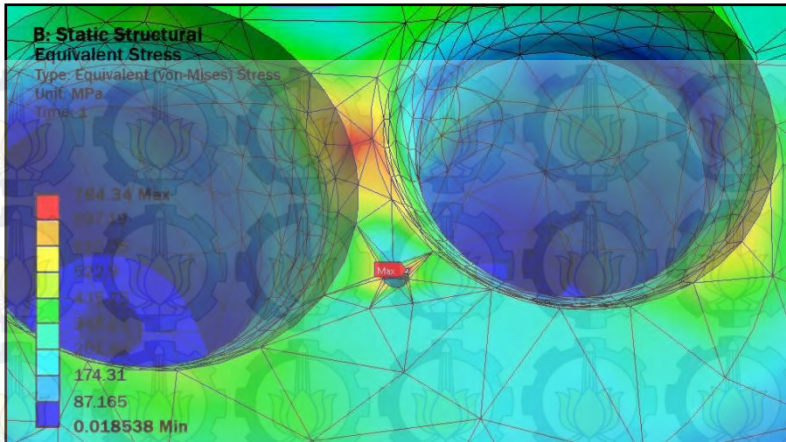
4.3.3 Cast Iron Cast Iron EN-GJS-1200

Gambar 4.20 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan total pada silinder head yang menggunakan material Cast Iron Cast Iron EN-GJS-1200. Sesuai dengan hasil simulasi static stress yang dilakukan sebelumnya telah didapatkan data tegangan akibat dari tekanan dan temperatur.

Dari simulasi distribusi tegangan akibat tekanan didapatkan nilai terbesar adalah sebesar 96,798 MPa dan nilai tegangan terkecil sebesar 0,0073124 MPa, dan untuk tegangan thermalnya yang terbesar adalah 771,42 MPa sedangkan yang terkecil adalah 0,033643 MPa, dan didapatkan tegangan total maksimal yang tertinggi sebesar 784,34 MPa dan yang terkecil sebesar 0,018538 MPa. Tegangan total maksimum ditandai dengan tanda panah berwarna merah pada gambar 4.21.



Gambar 4.20 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Total Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200

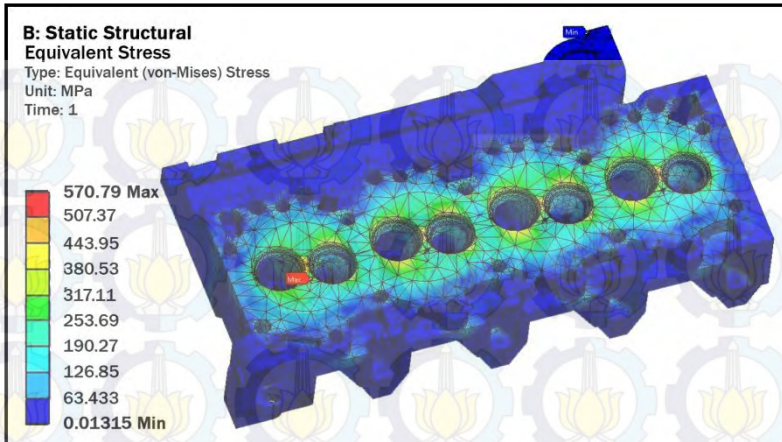


Gambar 4.21 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Total Maksimum Pada Silinder Head Dengan Material Cast Iron EN-GJS-1200

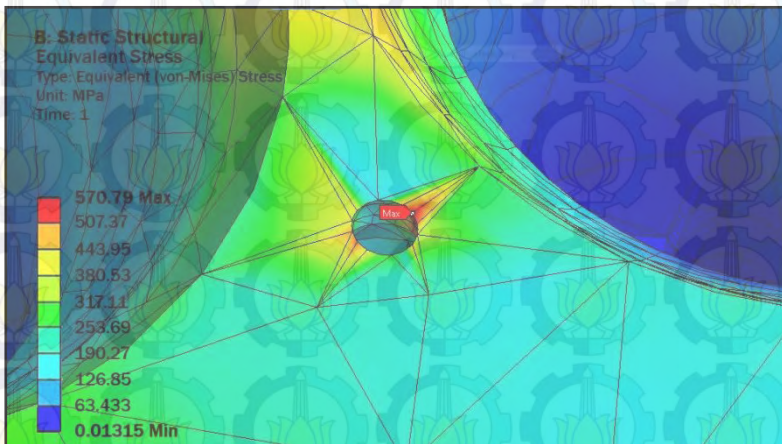
4.3.4 Aluminium Alloy AlSi₇Mg

Gambar 4.22 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan total pada silinder head yang menggunakan material Aluminium Alloy AlSi₇Mg. Sesuai dengan hasil simulasi static stress yang dilakukan sebelumnya telah didapatkan data tegangan akibat dari tekanan dan temperatur.

Dari simulasi distribusi tegangan akibat tekanan didapatkan nilai terbesar adalah sebesar 94,788 MPa dan nilai tegangan terkecil sebesar 0,0072553 MPa, dan untuk tegangan thermalnya yang terbesar adalah 539,93 MPa sedangkan yang terkecil adalah 0,022247 MPa, dan didapatkan tegangan total maksimal yang tertinggi sebesar 570,79 MPa dan yang terkecil sebesar 0,01315 MPa. Tegangan total maksimum ditandai dengan tanda panah berwarna merah pada gambar 4.23.



Gambar 4.22 Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Total Pada Silinder Head Dengan Material *Aluminium Alloy AlSi7Mg*



Gambar 4.23 Hasil Simulasi Yang Menunjukkan Tegangan Total Maksimum Pada Silinder Head Dengan Material *Aluminium Alloy AlSi7Mg*

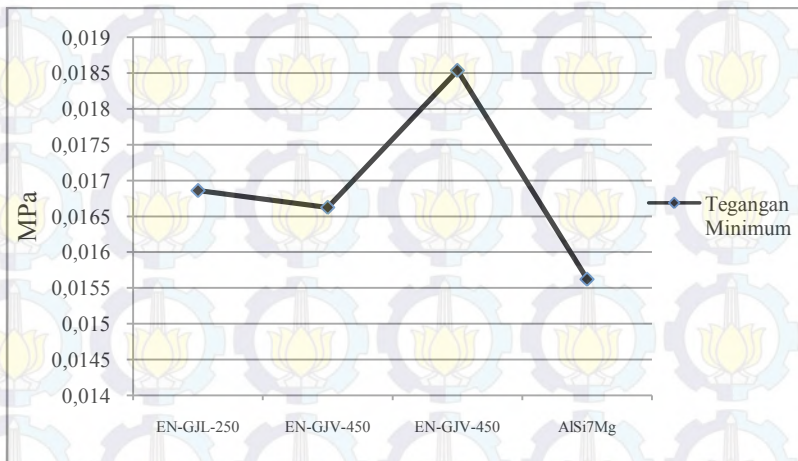
4.2.5 Analisa Tegangan Akibat Tekanan Pembakaran

Dari simulasi static stress untuk tegangan total pada software didapatkan hasil tegangan dari beberapa material yang

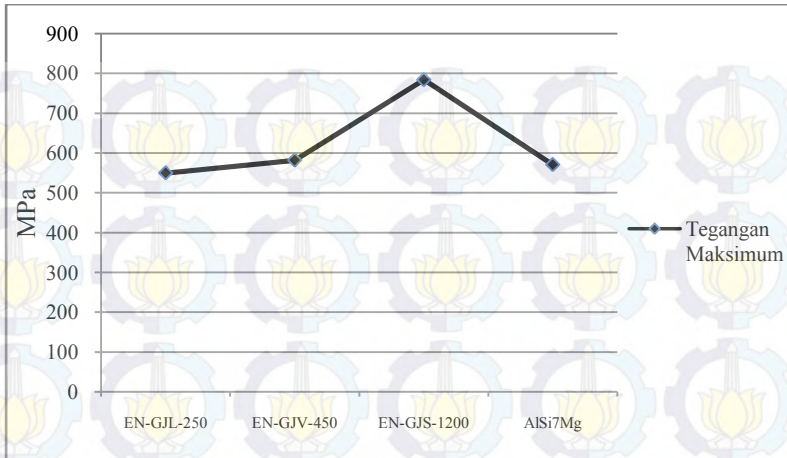
disimulasikan, dan didapatkan tabel serta grafik yang menunjukkan perbedaan tegangan yang terjadi akibat tekanan pembakaran pada silinder head dengan beberapa variasi material. Perbandingan tegangan pada silinder head dapat dilihat pada tabel 4.3 serta grafik 4.5 dan grafik 4.6.

Tabel 4.3 Tabel Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Total

Material	Intensitas Tegangan Minimum (MPa)	Intensitas Tegangan Maksimum (MPa)
Cast Iron EN-GJL-250	0,016861	549,79
Cast Iron EN-GJV-450	0,016626	582,24
Cast Iron EN-GJS-1200	0,018538	784,34
Aluminium Alloy AlSi ₇ Mg	0,015623	570,79



Grafik 4.5 Grafik Perbandingan Tegangan Total Minimum



Grafik 4.6 Grafik Perbandingan Tegangan Total Maksimum

Hasil simulasi menunjukkan tegangan maksimal terbesar dialami oleh silinder head yang menggunakan material Cast Iron EN-GJS-1200 yaitu sebesar 784,34 MPa dan silinder head yang mengalami tegangan maksimal terkecil yang menggunakan material Cast Iron EN-GJL-250 yaitu sebesar 549,24 MPa.

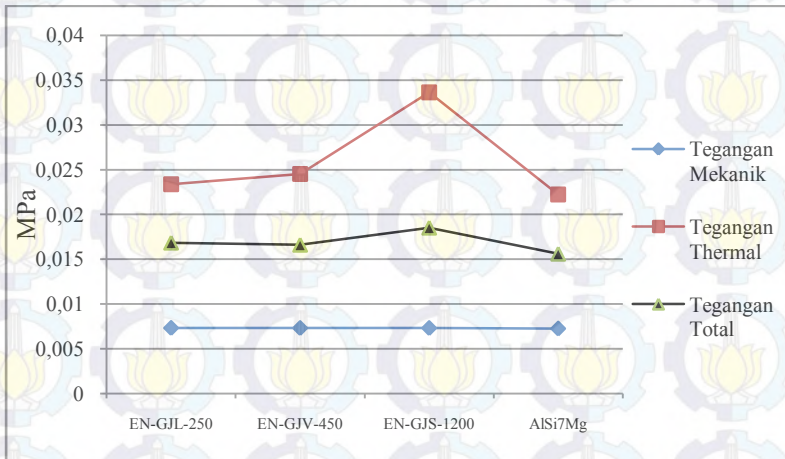
Tabel 4.4 Tabel Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Mekanik, Thermal, dan Tegangan Total Minimum

Material	Tegangan Mekanik Minimum (MPa)	Tegangan Thermal Minimum (MPa)	Tegangan Couple Minimum (MPa)
Cast Steel EN-GJL-250	0,0073231	0,023393	0,016861
Cast Steel EN-GJV-450	0,0073123	0,024533	0,016626
Cast Steel EN-GJS-1200	0,0073124	0,033643	0,018538
Aluminium Alloy AlSi ₇ Mg	0,0072553	0,022247	0,015623

4.4 Analisa Perbandingan Tegangan Pada Silinder Head

4.4.1 Perbandingan Tegangan Minimum

Tabel 4.4 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan minimum pada silinder head dengan beberapa material.



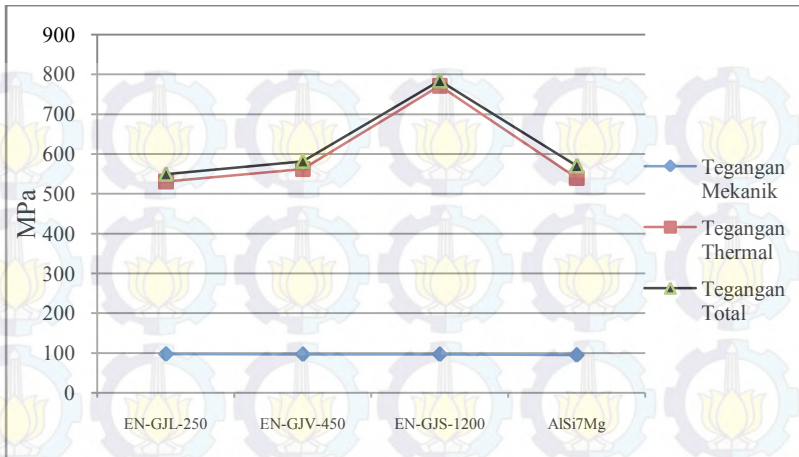
Grafik 4.7 Grafik Perbandingan Distribusi Tegangan Mekanik, Thermal, dan Tegangan Total Minimum

4.4.2 Perbandingan Tegangan Maksimum

Tabel 4.5 adalah hasil simulasi dari distribusi tegangan minimum pada silinder head dengan beberapa material.

Tabel 4.5 Tabel Data Hasil Simulasi Distribusi Tegangan Mekanik, Thermal, dan Tegangan Total Maksimum

Material	Tegangan Mekanik Maksimum (MPa)	Tegangan Thermal Maksimum (MPa)	Tegangan Couple Maksimum (MPa)
Cast Steel EN-GJL-250	97,321	530,89	549,79
Cast Steel EN-GJV-450	96,798	562,56	582,24
Cast Steel EN-GJS-1200	96,798	771,42	784,34
Aluminium Alloy AlSi ₇ Mg	94,788	539,93	570,79



Grafik 4.7 Grafik Perbandingan Distribusi Tegangan Mekanik, Thermal, dan Tegangan Total Maksimum

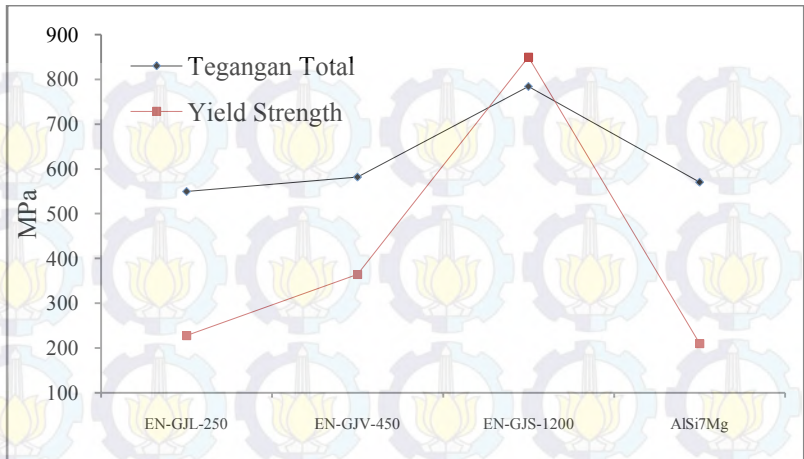
4.4.3 Perbandingan Tegangan Total dengan Yield Strength

Tabel 4.6 adalah data hasil dari simulasi tegangan total (*thermo-mechanics*) pada silinder head dengan material cast iron dan aluminium alloy dan juga data yield strength dari material tersebut.

Tabel 4.6 Tabel Tegangan Total Maksimum & Yield Strength Material

Material	Tegangan Total Maksimum (MPa)	Yield Strength (MPa)	Material Dapat Digunakan/Tidak
Cast Steel EN-GJL-250	549,79	228	Tidak
Cast Steel EN-GJV-450	582,24	365	Tidak
Cast Steel EN-GJS-1200	784,34	850	Ya
Aluminium Alloy AlSi ₇ Mg	570,79	210	Tidak

Dari tabel 4.6 bisa dilihat perbandingan antara yield strength dari material dan hasil dari simulasi tegangan total, dan material yang memiliki yield strength lebih besar dari tegangan couple adalah Cast Iron EN-GJS-1200 untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik 4.8.



Grafik 4.8 Grafik Perbandingan Tegangan Total (Couple) Maksimum dengan Yield Strength

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab kesimpulan dan saran akan dijelaskan kesimpulan dari data hasil penelitian yang telah dilakukan, serta disebutkan juga saran-saran yang menunjang baik untuk penelitian selanjutnya maupun sebagai masukan untuk penelitian lain.

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian tentang pengaruh tekanan dan temperatur ruang bakar terhadap tegangan pada silinder head motor diesel hasil *reverse engineering* yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa

1. Material yang mengalami tegangan paling tinggi akibat dari pengaruh tekanan adalah Cast Iron EN-GJL-250 yaitu sebesar 97,321 MPa, dan yang mengalami tegangan maksimal paling rendah adalah silinder head dengan material Aluminium Alloy AlSi7Mg, yaitu sebesar 94,788 MPa.
2. Material yang mengalami tegangan paling tinggi akibat dari pengaruh temperatur adalah Cast Iron EN-GJS-1200 yaitu sebesar 771,42 MPa, dan yang mengalami tegangan maksimal paling rendah adalah silinder head dengan material Cast Iron EN-GJL-250, yaitu sebesar 530,89 MPa.
3. Material yang mengalami tegangan total paling tinggi akibat dari pengaruh tekanan dan temperatur adalah Cast Iron EN-GJS-1200 yaitu sebesar 784,34 MPa, dan yang mengalami tegangan maksimal paling rendah adalah silinder head dengan material Cast Iron EN-GJL-250, yaitu sebesar 549,79 MPa. Dari simulasi tegangan total dapat dilakukan pemilihan material yang menggunakan

yield strength sebagai acuan untuk memilih material, hanya material Cast Iron EN-GJS-1200 yang memiliki nilai yield strength lebih dari nilai total stress, maka dapat disimpulkan material yang dapat digunakan untuk silinder head motor diesel 4 langkah 125 HP adalah Cast Iron EN-GJS-1200.

5.2 Saran

Karena pada penelitian kali ini pemilihan material hanya dilakukan berdasarkan kekuatan material, untuk itu perlu kajian lebih lanjut untuk pemilihan material berdasarkan aspek yang lain, seperti aspek kemudahan dalam fabrikasi dan biaya produksi.

DAFTAR PUSTAKA

Bagci, E. .2009. **Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies.** *Advances in Engineering Software*, Vol. 40, pp. 407–418, ISSN 0965-9978.

Eckert, C., Stacey, M., Earl, C. 2005. **References to Past Designs** in J.S Gero & Bonnardel (eds). **Studying Designers '05 (Key Centre of Design Computing and Cognition)**. Sydney: University of Sydney.

Eilam, Eldad., 2005. **Reversing: Secrets of Reverse Engineering.** Indianapolis: Wiley Publishing

Harrington, R. L. 1971. **Marine Engineering.** New York: The Society of Naval Architechs and Marine Engineers.

Heywood, J. B. 1988. **Internal Combustion Engine Fundamentals.** New York: McGraw-Hill, Inc.

Mecitoglu, Z. 2008. **Finite Element Analysis in Structures.** Istanbul: Istanbul Technical University.

Hutton, D. V. 2004. **Fundamentals of Finie Element Analysis.** New York: McGraw-Hill, Inc.

Krysl, P. 2005. **A Pragmatic Introduction to the Finite Element Method for Thermal and Stress Analysis.** San Diego: San Cooker Press

Li, S., Mao, J., Wang, S. 2008. **Cylinder Head FEM Analysis And its Improvement.** Beijing: China Agricultural University

Mello, C., Silva, C. E., Junior, J. H., Toledo, F. O., Guedes, F. N., Akagi, D. A., Xavier, A. F. 2012. **Integrating Reverse**

Engineering and Design for Manufacturing and Assembly in Products Redesigns: Results of Two Action Research Studies in Brazil in Dr. A.C. Telea (ed.). **Reverse Engineering - Recent Advances and Applications**. ISBN: 978-953-51-0158-1, InTech

Paratwar, A., Hulwan, D. 2013. “**Surface Temperature Prediction and Thermal Analysis of Cylinder Head in Diesel Engine**”. International Journal of Engineering Research and Applications. 3-4:892-902.

Pulkrabek, W. W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. New Jersey: Prentice Hall

Roylance, D. 2001. **Finite Element Analysis**. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology

Salazar, F. 1998. **Internal Combustion Engines**. Notre Dame: Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame

Rao, M. L. 2010. **A Study on Structural Stress Analysis of an Engine Cylinder Head**. Kandukur: Prakasam Engineering College

Taylor, D. A. 1983. **Introduction to Marine Engineering**. Oxford: Elsevier Ltd.

Tichánek, R., Španiel, M., Diviš, M. March 2005. “**Structural Stress Analysis of an Engine Cylinder Head**”. Acta Polytechnica Vol. 45, 43-48

LAMPIRAN A

Data pemodelan dari desain motor diesel yang didesain

Bore [mm]	102.0
Stroke [mm]	120.0
Connecting Rod Length [mm]	191.7
Piston Pin Offset [mm]	0.00
Displacement/Cylinder [liter]	0.981
Total Displacement [liter]	3.922
Number of Cylinders	4
Compression Ratio	16.50
Bore/Stroke	0.850
IVC [CA]	-76
EVO [CA]	106
IVO [CA]	332
EVC [CA]	418

LAMPIRAN B

Hasil Prediksi performa dari desain motor diesel @2200 rpm

Brake Power [kW]	93.3
Brake Power [HP]	125.1
Brake Torque [N-m]	405.1
IMEP [bar]	14.83
FMEP [bar]	1.84
PMEP [bar]	-1.24
Air Flow Rate [kg/hr]	359.9
BSAC [g/kW-h]	3857
Fuel Flow Rate [kg/hr]	86.6
BSFC [g/kW-h]	927.9
Volumetric Efficiency [%]	119.2
Volumetric Efficiency (M) [%]	119.2
Trapping Ratio	1.000
A/F Ratio	4.16
Brake Efficiency [%]	8.7

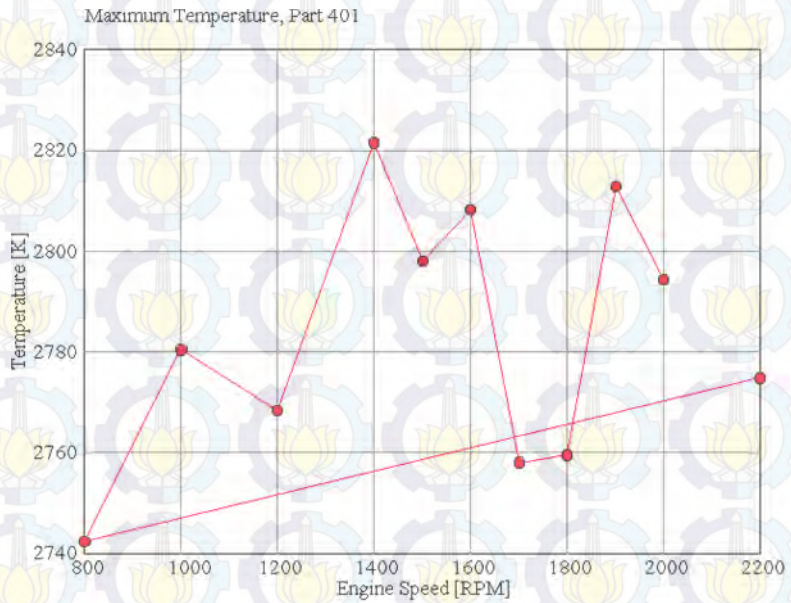
LAMPIRAN C

Tabel hasil simulasi Gas-Structure Heat Transfer

	Area [mm ²]	h _{g_eff} [W/m ² -K]	T _{g_eff} [K]	T _{wall} [K]	Q _{conv} [W]	Q _{rad} [W]	Q _{total} [W]	Q _{flux} [kW/m ²]
Piston 1	5099	569	1095	600	1435	365	1799	353
Piston 2	3930	569	1095	600	1106	281	1387	353
Piston 3	1593	569	1095	600	448	114	562	353
Head 1	5842	569	1095	570	1743	418	2162	370
Head 2	3718	569	1095	570	1109	266	1376	370
Head 3	1062	569	1095	570	317	76	393	370
Cylinder 1	6543	377	957	480	1178	48	1226	187
Cylinder 2	13081	193	667	480	474	0	474	36
Cylinder 3	19624	92	587	480	192	0	192	10

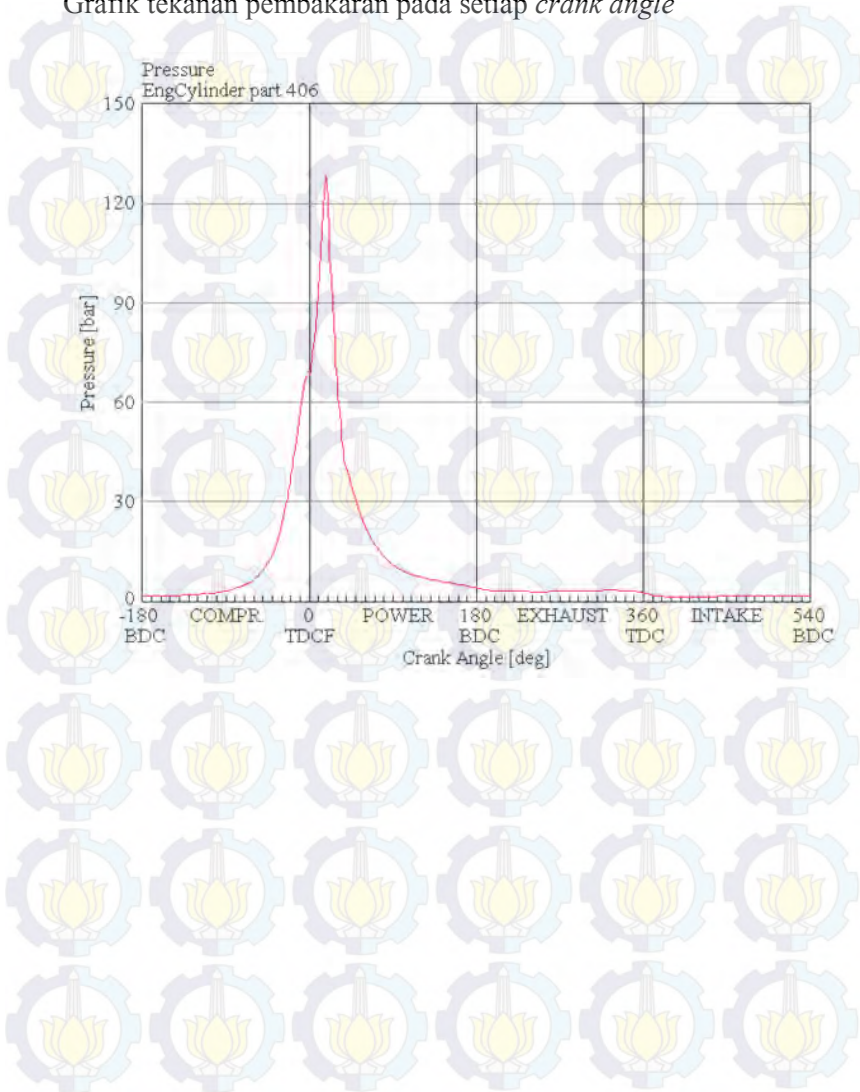
LAMPIRAN D

Grфик temperatur pembakaran pada setiap putaran mesin



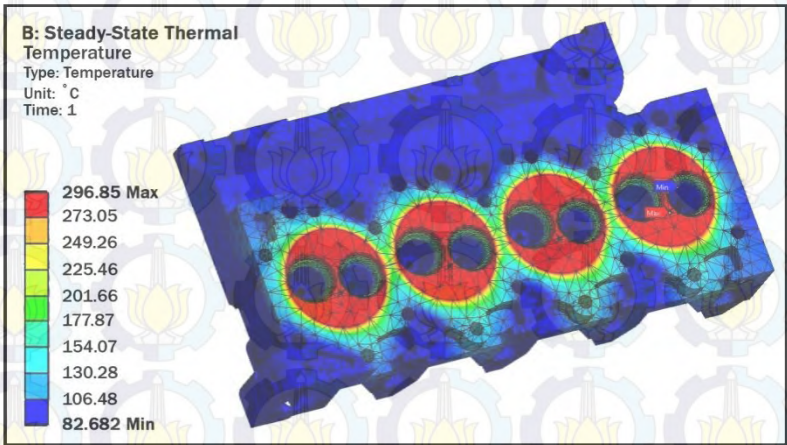
LAMPIRAN E

Grafik tekanan pembakaran pada setiap *crank angle*



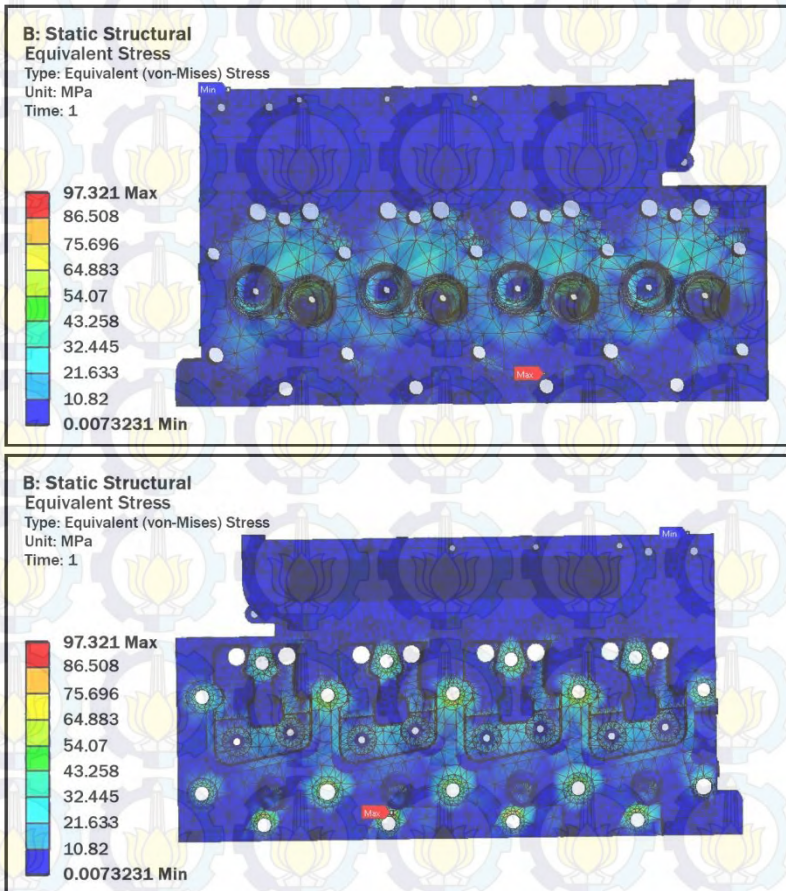
LAMPIRAN F

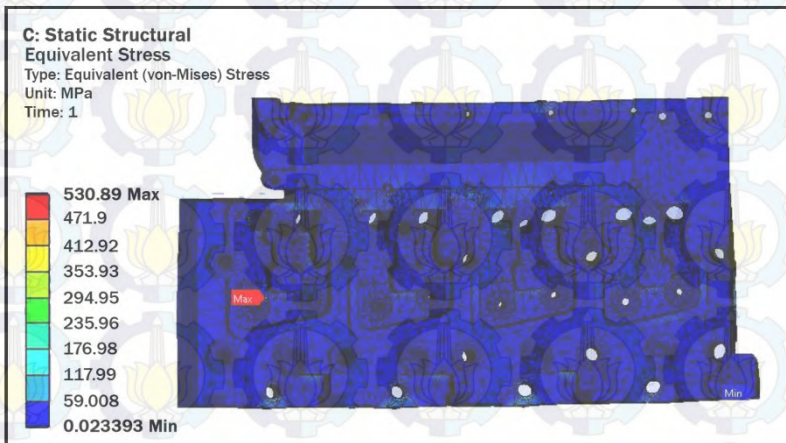
Hasil simulasi distribusi panas

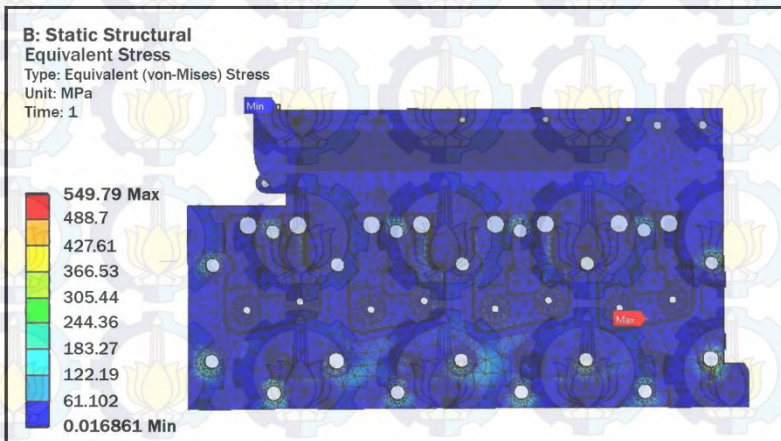
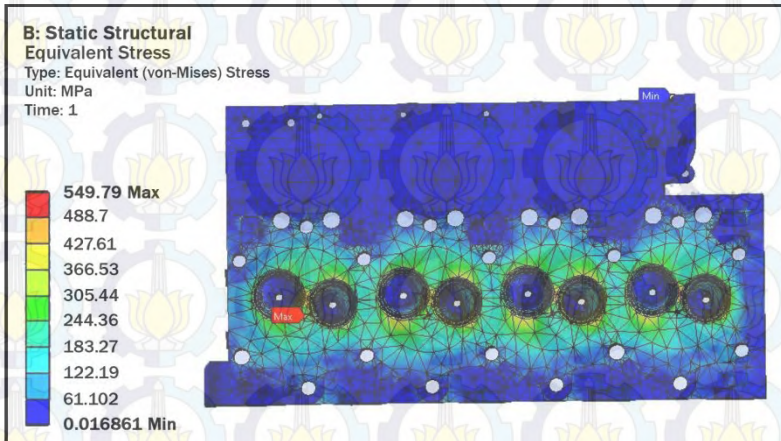


LAMPIRAN G

Pressure Stress — Material EN-GJL-250

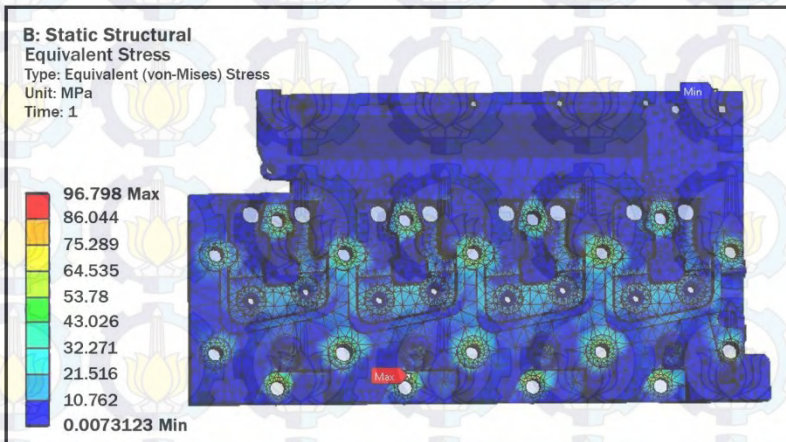
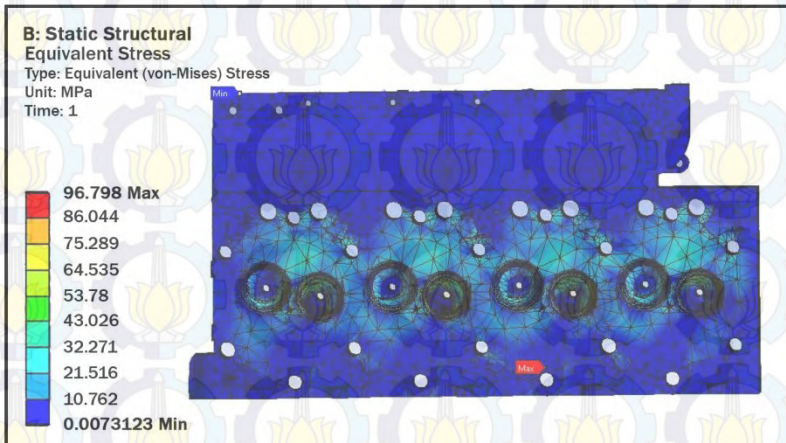


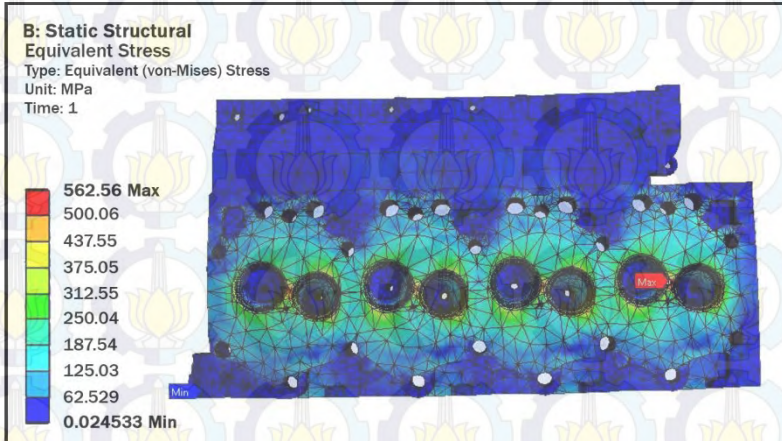
LAMPIRAN G (Lanjutan)**Thermal Stress — Material EN-GJL-250**

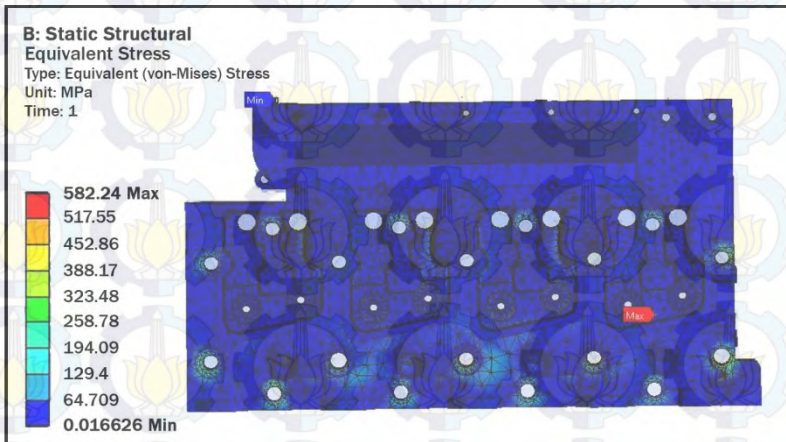
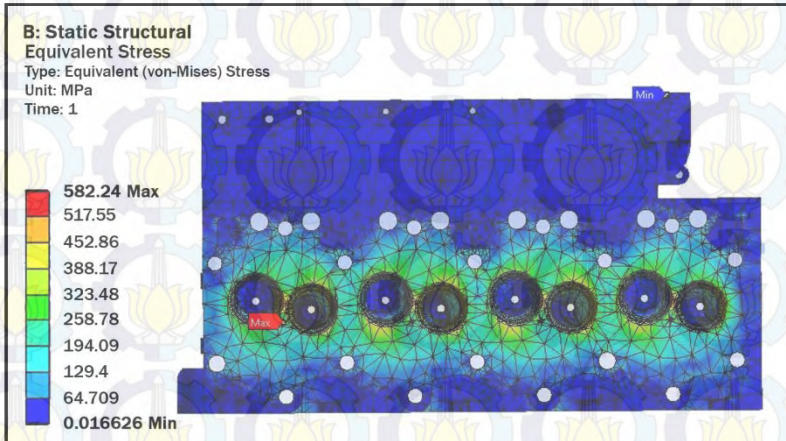
LAMPIRAN G (Lanjutan)**Total Stress — Material EN-GJL-250**

LAMPIRAN H

Pressure Stress — Material EN-GJV-450

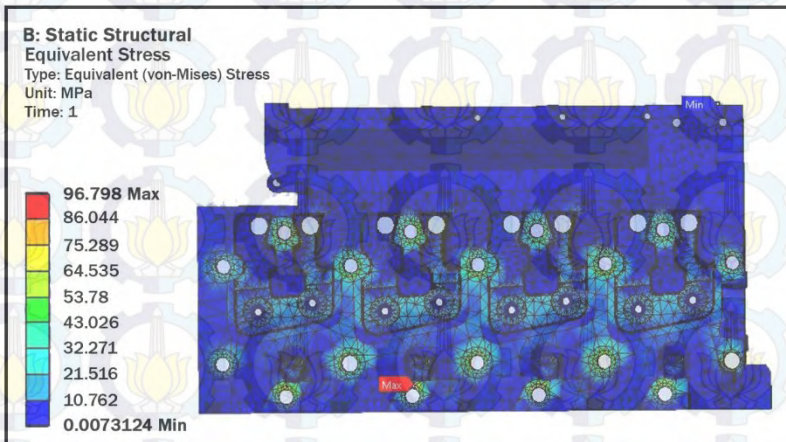
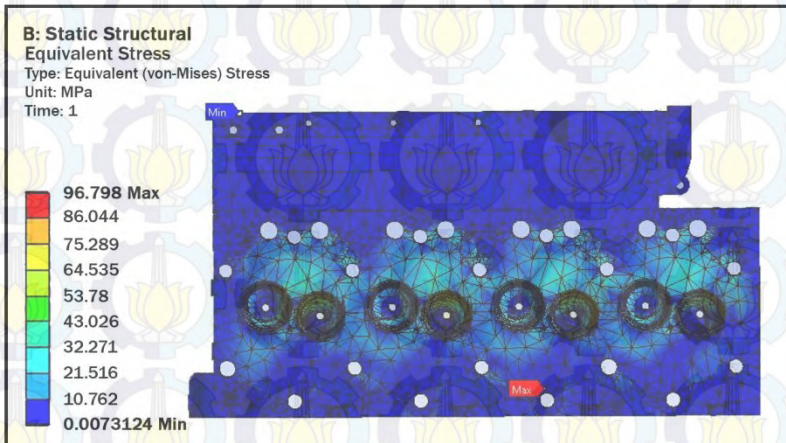


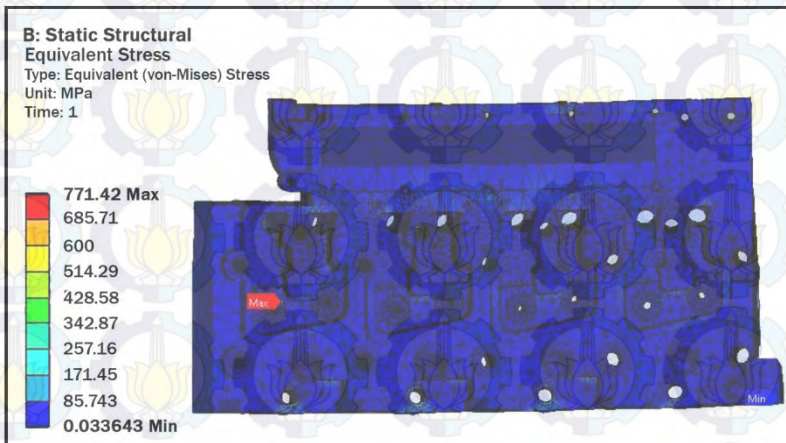
LAMPIRAN H (Lanjutan)**Thermal Stress — Material EN-GJV-450**

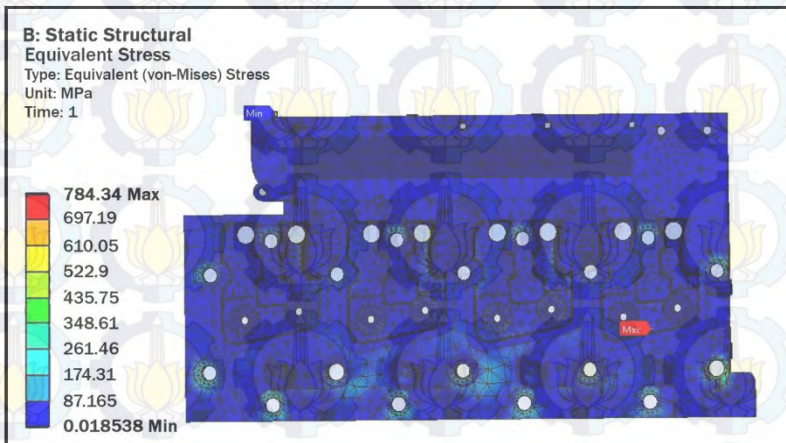
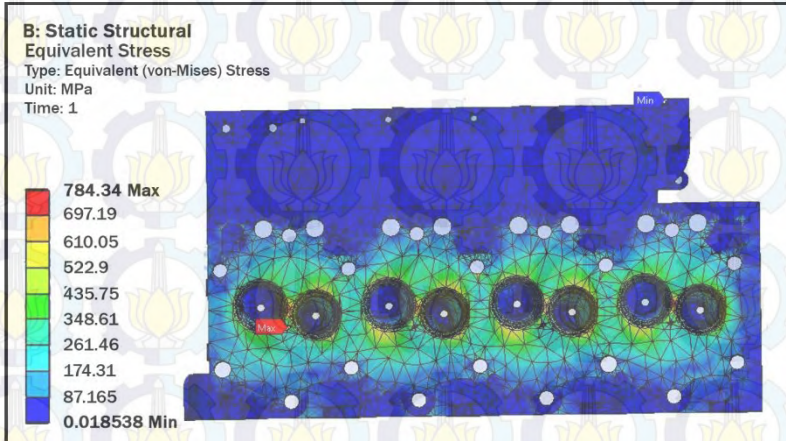
LAMPIRAN H (Lanjutan)**Total Stress — Material EN-GJV-450**

LAMPIRAN I

Pressure Stress — Material EN-GJS-1200

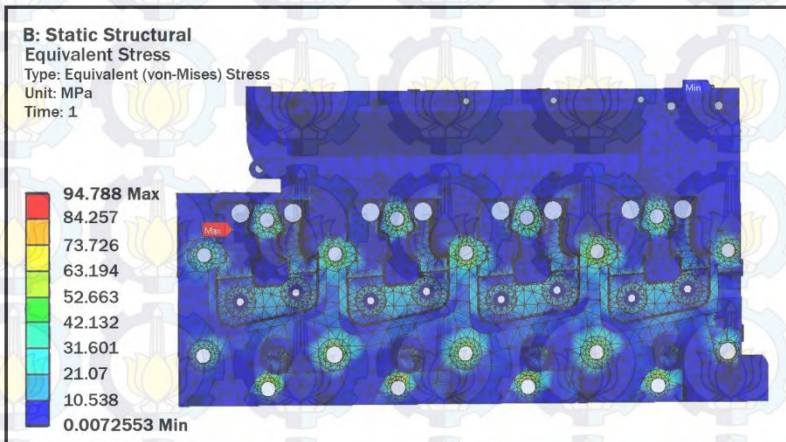
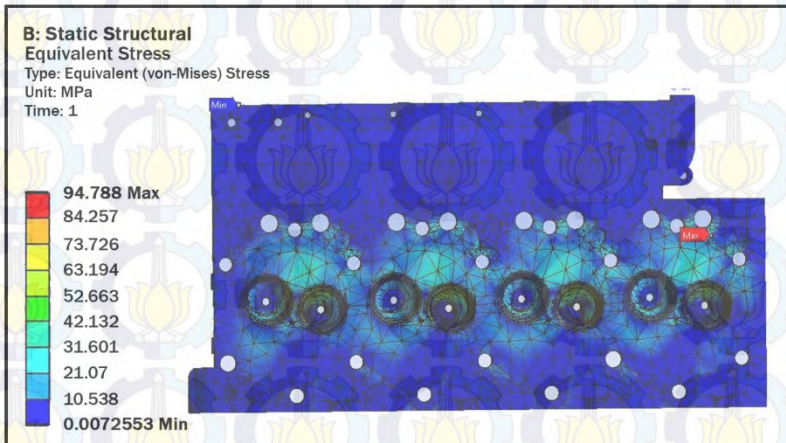


LAMPIRAN I (Lanjutan)**Thermal Stress — Material EN-GJS-1200**

LAMPIRAN I (Lanjutan)**Total Stress — Material EN-GJS-1200**

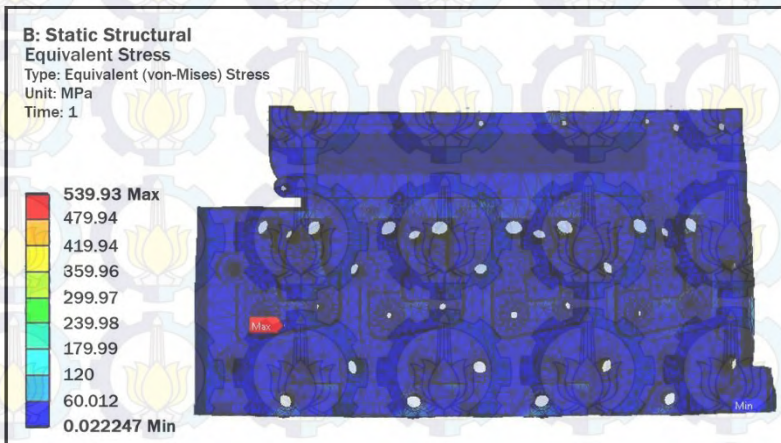
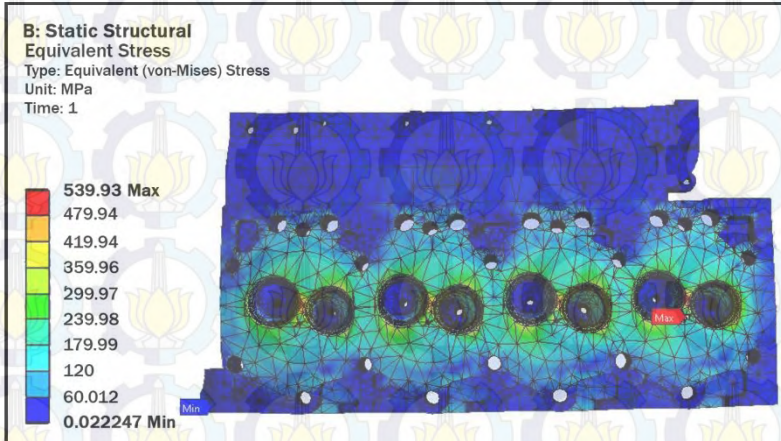
LAMPIRAN J

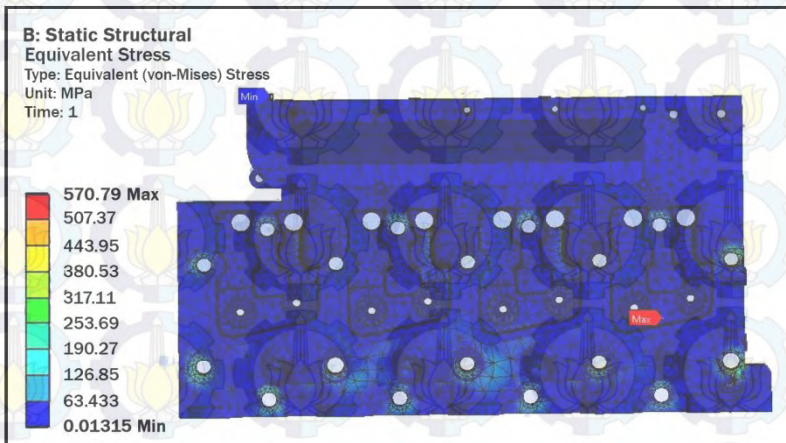
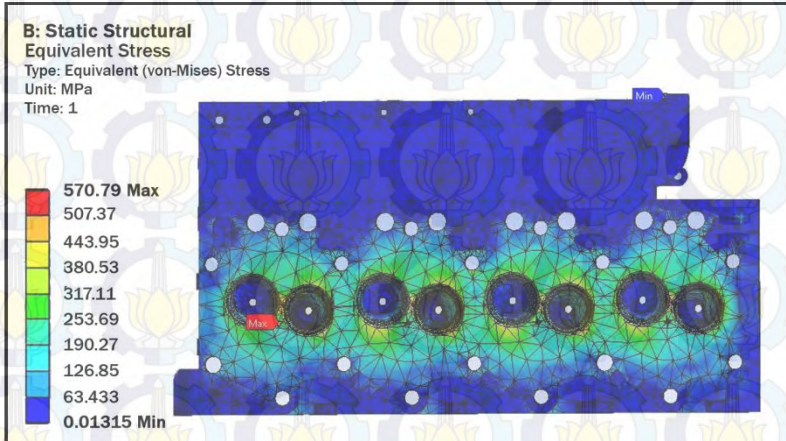
Pressure Stress — Material AlSi₇Mg



LAMPIRAN J (Lanjutan)

Thermal Stress — Material AlSi₇Mg



LAMPIRAN J (Lanjutan)**Total Stress — Material AlSi₇Mg**

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 3 November 1992, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SD Hang Tuah 10 Juanda, SMPN 1 Taman, dan SMAN 16 Surabaya dan setelah lulus pada tahun 2007 melanjutkan studi di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan melalui jalur SNMPTN dan mendapatkan NRP 4210100072. Selama studi di kampus perjuangan penulis aktif menjadi pengurus di himpunan mahasiswa jurusan sebagai staff dan menjadi ketua bidang pelatihan departemen PSDM pada tahun selanjutnya, selain itu penulis juga aktif sebagai panitia dan peserta dalam berbagai kegiatan seperti Marine Icon dan Seminar Nasional Teknologi Kelautan (SENTA) 2012, dan juga menjadi member di Laboratorium Mesin Kapal & Getaran tahun 2013-2014.